



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

Diseño e implementación de una herramienta  
académica de aprendizaje para sistemas GNSS

Design and implementation of an academic learning  
tool for GNSS systems

Autor

Guillermo Ramos García

Directora

Paloma García Ducar

Máster en Ingeniería de Telecomunicación

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

2021

# Diseño e implementación de una herramienta académica de aprendizaje para sistemas GNSS

## RESUMEN

Los sistemas de navegación por satélite suponen la integración de un sin fin de tecnologías y precisan de una perfecta combinación de conocimientos en múltiples campos como la física, la aeronáutica y las telecomunicaciones. Desde que comenzó el desarrollo de estos complejos sistemas en la segunda mitad del siglo XX no han parado de evolucionar, alcanzándose cada vez sistemas más precisos, fiables y seguros. Todavía hoy la importancia de estos sistemas como GNSS (Global Navigation Satellite Systems) o SBAS (Satellite Based Augmentation Systems) sigue creciendo, y la demanda en el mercado de perfiles ingenieriles con amplios conocimientos en estas materias sigue aumentando. Por este motivo, la formación en sistemas de navegación por satélite en grados y másteres como es la ingeniería en telecomunicaciones debe ser una prioridad. Así, este trabajo tiene como objetivo fundamental facilitar tanto el aprendizaje como la enseñanza en este ámbito, permitiendo a los estudiantes adquirir unas destrezas y conocimientos en navegación por satélite de una manera sencilla, entretenida y sobretodo enfocada en sus futuros profesionales.

Se ha implementado la herramienta *GNSS Studio*. Se trata de un programa basado en Matlab que se compone de múltiples utilidades para el estudio de los sistemas GNSS y SBAS. Desde los ficheros RINEX que son la base de estos sistemas, pasando por el estudio de los errores en el usuario y las órbitas de los satélites, hasta la complejidad de los sistemas SBAS, *GNSS Studio* encapsula todo lo necesario para alcanzar un nivel de dominio avanzado de los sistemas de navegación por satélite. Se han desarrollado diferentes scripts y funciones en Matlab y se han integrado en una interfaz gráfica empleando 'Matlab App Designer' para que el uso de los mismos sea más fácil, intuitivo y transparente para el usuario. Además con la integración de otras herramientas externas de software libre y la creación de ayudas interactivas, hacen de *GNSS Studio* una herramienta muy completa. En esta memoria se explica como ha sido el desarrollo de la herramienta, las posibilidades que ofrece y su forma de uso.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>4</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
1.1. Motivación .....	7
1.2. Objetivos .....	7
1.3. Organización de la memoria .....	8
<b>2. FICHEROS RINEX.....</b>	<b>9</b>
2.1. Tipos de Archivos RINEX.....	9
2.1.1. RINEX de Navegación .....	9
2.1.2. RINEX de Observación .....	10
2.1.3. RINEX SP3 .....	11
2.2. Adquisición de ficheros RINEX .....	12
2.3. Visualización en GNSS Studio .....	13
<b>3. GLAB.....</b>	<b>18</b>
3.1. Input .....	18
3.2. Preprocess .....	19
3.3. Modelling .....	20
3.4. Filter.....	21
3.5. Output.....	22
3.6. Análisis .....	22
<b>4. SBAS .....</b>	<b>25</b>
4.1. Tipos de sistemas de aumentación .....	25
4.2. Infraestructura SBAS .....	26
4.3. Conceptos básicos SBAS .....	27
4.4. Stanford Diagram.....	30
4.5. SBAS Cylinder simulator .....	31
4.6. Información mensajes SBAS .....	32
4.7. SBAS Teacher .....	34
4.8. SBAS Mentor.....	35
<b>5. TOOLS.....</b>	<b>36</b>
<b>6. LISTADO EJERCICIOS .....</b>	<b>38</b>
6.1. Ejercicios ficheros RINEX .....	38
6.1.1. Descarga de ficheros RINEX .....	38
6.1.2. Visualización de las medidas de observaciones.....	38
6.1.3. Visualización de las medidas de los ficheros de navegación .....	39
6.1.4. Visualización de las medidas de los ficheros SP3.....	39

6.1.5.	Generación de ficheros RINEX con app móvil.....	40
<b>6.2.</b>	<b>Ejercicios Tools .....</b>	<b>40</b>
<b>6.3.</b>	<b>Ejercicios con gLAB .....</b>	<b>40</b>
6.3.1.	Posicionamiento Estándar (Standard Point Positioning - SPP) .....	41
6.3.2.	Posicionamiento preciso (Precise Point Positioning - PPP) .....	41
6.3.3.	Precisión en el posicionamiento según la localización en la tierra.....	41
6.3.4.	Calidad del receptor .....	42
<b>6.4.</b>	<b>Ejercicios SBAS.....</b>	<b>42</b>
6.4.1.	Cilindro SBAS .....	42
6.4.2.	Diagrama de Standford .....	43
6.4.3.	Estructura de mensajes SBAS.....	44
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>45</b>
	<b>CRONOGRAMA.....</b>	<b>47</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>48</b>
	<b>ACRÓNIMOS.....</b>	<b>50</b>
	<b>ANEXO I: CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA ‘RINEX’ DE GNSS STUDIO.....</b>	<b>51</b>
I.A.	RINEX DE OBSERVACIONES.....	51
I.B.	RINEX DE NAVEGACIÓN.....	55
I.C.	RINEX SP3 .....	59
	<b>ANEXO II. CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA ‘TOOLS’ DE GNSS STUDIO .....</b>	<b>63</b>
II.A.	CONVERSIÓN CRX A RNX Y RNX A CRX.....	63
II.B.	CONVERSION ENTRE UTC Y TIEMPO GPS .....	65
II.C.	CONVERSIÓN DE EFEMÉRIDES A LLA .....	66
II.D.	CONVERSIÓN ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS.....	67
	<b>ANEXO III. CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA ‘GLAB’ DE GNSS STUDIO.....</b>	<b>69</b>
III.A.	AYUDAS PARA GLAB EN GNSS STUDIO .....	69
III.B.	IMÁGENES GLAB DE LA SECCIÓN DE EJERCICIOS .....	75
	<b>ANEXO IV. CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA ‘SBAS’ DE GNSS STUDIO .....</b>	<b>86</b>
IV.A.	CILINDRO SBAS .....	86
IV.B.	STANDFORD DIAGRAM .....	88
IV.C.	ESTRUCTURA DE MENSAJES SBAS .....	91



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESTRUCTURA RINEX DE NAVEGACIÓN .....	10
FIGURA 2. ESTRUCTURA RINEX DE OBSERVACIÓN .....	11
FIGURA 3. ESTRUCTURA RINEX SP3 .....	12
FIGURA 4. VENTANA 'RINEX' DE GNSS STUDIO .....	14
FIGURA 5. EJEMPLO MEDIDA DE FASE PARA RECEPTOR EN A CORUÑA.....	15
FIGURA 6. EJEMPLO MEDIDA DE PSEUDORANGO PARA RECEPTOR EN A CORUÑA .....	15
FIGURA 7. EJEMPLO EVOLUCIÓN DE LAS MEDIDAS DE SNR RECEPTOR EN A CORUÑA.....	16
FIGURA 8. ÓRBITAS Y TRAZAS DE SATÉLITES GPS A PARTIR DE RINEX DE NAVEGACIÓN .....	16
FIGURA 9. ÓRBITAS Y TRAZAS DE SATÉLITES A PARTIR DE SP3.....	17
FIGURA 10. AYUDA GLAB INPUT EN GNSS STUDIO.....	19
FIGURA 11. AYUDA GLAB PREPROCESSING EN GNSS STUDIO.....	20
FIGURA 12. AYUDA GLAB MODELLING EN GNSS STUDIO .....	21
FIGURA 13. AYUDA GLAB FILTER EN GNSS STUDIO .....	22
FIGURA 14. AYUDA GLAB OUTPUT EN GNSS STUDIO .....	22
FIGURA 15. DILUTION OF PRECISION (DOP).....	23
FIGURA 16. AYUDA GLAB ANALYSIS EN GNSS STUDIO.....	23
FIGURA 17. EJEMPLOS FIGURAS GLAB. ERROR EN EL POSICIONAMIENTO NEU, HORIZONTAL, DILUTION OF PRECISIÓN Y SKYPLOT ..	24
FIGURA 18. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA SBAS .....	26
FIGURA 19. VALORES DE LOS PARÁMETROS DE INTEGRIDAD EN FUNCIÓN DEL MODO DE OPERACIÓN [10] .....	27
FIGURA 20. CILINDRO SBAS [13] .....	28
FIGURA 21. CASOS POSIBLES EN FUNCIÓN DE HAL, HPL Y HPE .....	29
FIGURA 22. CASOS POSIBLES EN FUNCIÓN DE VAL, VPL Y VPE [12], [14] .....	29
FIGURA 23. DIAGRAMA DE STANDFORD [13] .....	30
FIGURA 24. HERRAMIENTA STANDFORD DIAGRAM EN GNSS STUDIO.....	30
FIGURA 25. NIVELES DE ALERTA PARA DIFERENTES MODOS DE OPERACIÓN [16] .....	31
FIGURA 26. HERRAMIENTA CILINDRO SBAS EN GNSS STUDIO .....	31
FIGURA 27. EJEMPLO IMAGEN OBTENIDA CON HERRAMIENTA DE CILINDRO SBAS DE GNSS STUDIO.....	32
FIGURA 28. RED DE IGP (IONOSPHERIC GRID POINTS) Y BANDAS .....	33
FIGURA 29. AYUDAS ESTRUCTURA MENSAJES SBAS EN GNSS STUDIO.....	34
FIGURA 30. EJEMPLO AYUDA TIPOS DE MENSAJES SBAS DE GNSS STUDIO .....	34
FIGURA 31. PESTAÑA 'TOOLS' DE GNSS STUDIO .....	37
FIGURA 32. EJEMPLO VISUALIZACIÓN MEDIDAS DE FASE, CÓDIGO Y SNR PARA SATÉLITE DE GALILEO.....	38
FIGURA 33. EJEMPLO ÓRBITAS Y TRAZAS DE CUATRO SATÉLITES GPS A PARTIR DE FICHERO DE NAVEGACIÓN, DÍA 01/01/2020.....	39
FIGURA 34. EJEMPLO ÓRBITAS Y TRAZAS DE CUATRO SATÉLITES GPS A PARTIR DE FICHERO SP3, DÍA 01/01/2020.....	40
FIGURA 35. EJEMPLO CILINDRO SBAS CON GNSS STUDIO .....	43
FIGURA 36. EJEMPLO MUESTRA BASE DE DATOS DEL DIAGRAMA DE STANDFORD DE GNSS STUDIO.....	44
FIGURA 37. VENTANA PROCESADO RINEX DE OBSERVACIÓN.....	51
FIGURA 38. AYUDAS PARA ENTENDER COMO CARGAR Y PROCESAR FICHEROS RINEX DE OBSERVACIÓN .....	51
FIGURA 39. SELECCIÓN DEL ARCHIVO RINEX DE OBSERVACIÓN A PROCESAR.....	52
FIGURA 40. VENTANA RINEX DE OBSERVACIÓN TRAS SELECCIONAR UN FICHERO.....	52
FIGURA 41. LECTURA Y PROCESADO EL FICHERO RINEX DE OBSERVACIÓN.....	53
FIGURA 42. FICHERO DE OBSERVACIÓN RINEX PROCESADO CORRECTAMENTE .....	53
FIGURA 43. EJEMPLO VISUALIZACIÓN MEDIDAS DE FASE PARA EL SATÉLITE 3 DE GPS .....	53
FIGURA 44. EJEMPLO VISUALIZACIÓN MEDIDAS DE CÓDIGO (PSEUDORANGO) PARA EL SATÉLITE 3 DE GPS .....	54
FIGURA 45. EJEMPLO VISUALIZACIÓN MEDIDAS DE RELACIÓN SEÑAL A RUIDO PARA EL SATÉLITE 3 DE GPS.....	54
FIGURA 46. MENSAJE DE ERROR CUANDO NO HAY MEDIDAS PARA VISUALIZAR PARA LAS OPCIONES ESCOGIDAS .....	55
FIGURA 47. VENTANA DE LECTURA Y PROCESADO DE FICHEROS RINEX DE NAVEGACIÓN.....	55
FIGURA 48. AYUDA VENTANA RINEX NAVEGACIÓN.....	56
FIGURA 49. SELECCIÓN DEL FICHERO DE NAVEGACIÓN A PROCESAR CON GNSS STUDIO.....	56
FIGURA 50. VENTANA PROCESO DE LECTURA DE FICHERO RINEX DE NAVEGACIÓN .....	57
FIGURA 51. FICHERO RINEX DE NAVEGACIÓN PROCESADO CORRECTAMENTE .....	57
FIGURA 52. EJEMPLO VISUALIZACIÓN 3D DE LAS ÓRBITAS DE CUATRO SATÉLITES GPS A PARTIR DE FICHERO RINEX DE NAVEGACIÓN .....	58
FIGURA 53. EJEMPLO VISUALIZACIÓN 3D DE LAS TRAZAS DE 4 SATÉLITES GPS A PARTIR DE FICHERO RINEX DE NAVEGACIÓN .....	58

FIGURA 54. VENTANA DE LECTURA Y PROCESADO DE FICHEROS RINEX SP3 .....	59
FIGURA 55. AYUDAS EN LA VENTANA DE PROCESADO DE RINEX SP3.....	59
FIGURA 56. SELECCIÓN DE ARCHIVO RINEX SP3 .....	60
FIGURA 57. PROCESADO DEL FICHERO RINEX SP3.....	60
FIGURA 58. PROCESADO DEL FICHERO RINEX SP3 COMPLETADA CORRECTAMENTE .....	61
FIGURA 59. EJEMPLO VISUALIZACIÓN 3D DE LAS ÓRBITAS DE 5 SATÉLITES GPS A PARTIR DE FICHERO SP3 .....	61
FIGURA 60. EJEMPLO VISUALIZACIÓN DE LAS TRAZAS DE 5 SATÉLITES GPS A PARTIR DE FICHERO SP3.....	62
FIGURA 61. VENTANA CONVERSIÓN CRX-RNX EN GNSS STUDIO.....	63
FIGURA 62. SELECCIÓN FICHERO RINEX O CRX A COMPRIMIR O DESCOMPRIMIR .....	63
FIGURA 63. EJEMPLO CONVERSIÓN EXITOSA CRX-RNX.....	64
FIGURA 64. EJEMPLO INTENTO DE CONVERSIÓN DE FICHERO CON EXTENSIÓN ERRONEA .....	64
FIGURA 65. EJEMPLO ERROR GENÉRICO DURANTE CONVERSIÓN CRX-RNX.....	65
FIGURA 66. VENTANA CONVERSIÓN UTC-GPS TIME .....	65
FIGURA 67. SELECCIÓN DE TIEMPO UTC Y CONVERSIÓN A TIEMPO GPS .....	66
FIGURA 68. SELECCIÓN DE TIEMPO GPS Y CONVERSIÓN A UTC.....	66
FIGURA 69. VENTANA CONVERSIÓN DE EFEMÉRIDES A LLA DE GNSS STUDIO.....	67
FIGURA 70. RESULTADO CONVERSIÓN DE EFEMÉRIDES A LLA.....	67
FIGURA 71. VENTANA CONVERSIÓN DE COORDENADAS DE GNSS STUDIO.....	68
FIGURA 72. EJEMPLO CAMBIO DE COORDENADAS.....	68
FIGURA 73. AYUDA GLAB INPUT WINDOW EN GNSS STUDIO .....	69
FIGURA 74. AYUDA RUN GLAB EN GNSS STUDIO.....	69
FIGURA 75. AYUDA GLAB PREPROCESS WINDOW EN GNSS STUDIO.....	70
FIGURA 76. AYUDA SALTOS DE CICLO GLAB EN GNSS STUDIO .....	70
FIGURA 77. AYUDA SELECCIÓN SATÉLITES GLAB EN GNSS STUDIO.....	70
FIGURA 78. AYUDA OPCIONES DE SATÉLITE GLAB EN GNSS STUDIO.....	71
FIGURA 79. AYUDA GLAB MODELLING WINDOW EN GNSS STUDIO .....	71
FIGURA 80. AYUDA GLAB FILTER WINDOW EN GNSS STUDIO .....	71
FIGURA 81. AYUDA OPCIONES FILTRADO GLAB EN GNSS STUDIO.....	72
FIGURA 82. AYUDA PROCESADO SINGLE VS DUAL FREQUENCY GLAB EN GNSS STUDIO .....	72
FIGURA 83. AYUDA PROCESADO ESTÁTICO VS DINÁMICO GLAB EN GNSS STUDIO.....	72
FIGURA 84. AYUDA GLAB OUTPUT WINDOW EN GNSS STUDIO .....	73
FIGURA 85. AYUDA GLAB ANALYSIS WINDOW EN GNSS STUDIO.....	73
FIGURA 86. AYUDA GRÁFICA DE SALIDA POSICIÓN NEU GLAB EN GNSS STUDIO.....	73
FIGURA 87. AYUDA GRÁFICA DE SALIDA ERROR DE POSICIÓN HORIZONTAL GLAB EN GNSS STUDIO .....	74
FIGURA 88. AYUDA GRÁFICA DE SALIDA DOP DE GLAB EN GNSS STUDIO .....	74
FIGURA 89. AYUDA GRÁFICA DE SALIDA SKYLOT DE GLAB EN GNSS STUDIO .....	74
FIGURA 90. ERROR DE POSICIONAMIENTO NEU RECEPTOR MADRID MODO DINÁMICO .....	75
FIGURA 91. ERROR DE POSICIONAMIENTO HORIZONTAL RECEPTOR MADRID MODO DINÁMICO .....	75
FIGURA 92. ERROR DE POSICIONAMIENTO NEU RECEPTOR MADRID MODO ESTÁTICO.....	76
FIGURA 93. ERROR DE POSICIONAMIENTO HORIZONTAL RECEPTOR MADRID MODO ESTÁTICO.....	76
FIGURA 94. ERROR DE POSICIONAMIENTO NEU RECEPTOR MADRID MODO PPP ESTÁTICO.....	77
FIGURA 95. ERROR DE POSICIONAMIENTO HORIZONTAL RECEPTOR MADRID MODO PPP ESTÁTICO.....	77
FIGURA 96. ERROR DE POSICIONAMIENTO NEU RECEPTOR MADRID MODO PPP DINÁMICO .....	78
FIGURA 97. ERROR DE POSICIONAMIENTO HORIZONTAL RECEPTOR MADRID MODO PPP DINÁMICO .....	78
FIGURA 98. ERROR DE POSICIONAMIENTO NEU RECEPTOR CERCA DEL POLO NORTE MODO SPP DINÁMICO.....	79
FIGURA 99. ERROR DE POSICIONAMIENTO HORIZONTAL RECEPTOR CERCA DEL POLO NORTE MODO SPP DINÁMICO.....	79
FIGURA 100. DILUTION OF PRECISION RECEPTOR CERCA DEL POLO NORTE MODO SPP DINÁMICO .....	80
FIGURA 101. SKYLOT RECEPTOR CERCA DEL POLO NORTE MODO SPP DINÁMICO .....	80
FIGURA 102. DILUTION OF PRECISION RECEPTOR MADRID MODO SPP DINÁMICO .....	81
FIGURA 103. SKYLOT RECEPTOR MADRID MODO SPP DINÁMICO .....	81
FIGURA 104. ERROR DE POSICIONAMIENTO NEU RECEPTOR CERCA DEL ECUADOR MODO SPP DINÁMICO .....	82
FIGURA 105. ERROR DE POSICIONAMIENTO HORIZONTAL RECEPTOR CERCA DEL ECUADOR MODO SPP DINÁMICO .....	82
FIGURA 106. DILUTION OF PRECISION RECEPTOR CERCA DEL ECUADOR MODO SPP DINÁMICO.....	83
FIGURA 107. SKYLOT RECEPTOR CERCA DEL ECUADOR MODO SPP DINÁMICO .....	83
FIGURA 108. ERROR DE POSICIONAMIENTO NEU RECEPTOR DE GAMA ALTA MODO SPP DINÁMICO .....	84
FIGURA 109. ERROR DE POSICIONAMIENTO HORIZONTAL RECEPTOR DE GAMA ALTA MODO SPP DINÁMICO .....	84
FIGURA 110. ERROR DE POSICIONAMIENTO NEU RECEPTOR DE GAMA BAJA MODO SPP DINÁMICO.....	85

FIGURA 111. ERROR DE POSICIONAMIENTO HORIZONTAL RECEPTOR DE GAMA BAJA MODO SPP DINÁMICO.....	85
FIGURA 112. EJEMPLO CILINDRO SBAS, NOMINAL OPERATION.....	86
FIGURA 113. EJEMPLO CILINDRO SBAS, MISLEADING INFORMATION .....	87
FIGURA 114. EJEMPLO CILINDRO SBAS, HAZARDOUS MISLEADING INFORMATION.....	87
FIGURA 115. EJEMPLO CILINDRO SBAS, SYSTEM UNAVAILABLE.....	88
FIGURA 116. EJEMPLO CILINDRO SBAS, SYSTEM UNAVAILABLE MISLEADING INFORMATION .....	88
FIGURA 117. VENTANA STANDFORD DIAGRAM EN GNSS STUDIO.....	89
FIGURA 118. EJEMPLO 1 HERRAMIENTA STANDFORD DIAGRAM.....	89
FIGURA 119. EJEMPLO 2 HERRAMIENTA STANDFORD DIAGRAM.....	90
FIGURA 120. EJEMPLO 3 HERRAMIENTA STANDFORD DIAGRAM.....	90
FIGURA 121. HERRAMIENTA ESTRUCTURA DE MENSAJES SBAS EN GNSS STUDIO.....	91
FIGURA 122. AYUDA MENSAJE TIPO 1.....	91
FIGURA 123. AYUDA MENSAJE TIPOS 2 A 5.....	92
FIGURA 124. AYUDA MENSAJE TIPO 6.....	92
FIGURA 125. AYUDA MENSAJE TIPO 7.....	92
FIGURA 126. AYUDA MENSAJE TIPO 9.....	93
FIGURA 127. AYUDA MENSAJE TIPO 17.....	93
FIGURA 128. AYUDA MENSAJE TIPO 24.....	93
FIGURA 129. AYUDA MENSAJE TIPO 25.....	94
FIGURA 130. AYUDA MENSAJE TIPO 28.....	94
FIGURA 131. AYUDA MENSAJE TIPO 18.....	94
FIGURA 132. AYUDA MENSAJE TIPO 26.....	95
FIGURA 133. AYUDA MENSAJE TIPO 0.....	95
FIGURA 134. AYUDA MENSAJE TIPO 10.....	95
FIGURA 135. AYUDA MENSAJE TIPO 12.....	96
FIGURA 136. AYUDA MENSAJE TIPO 27.....	96
FIGURA 137. AYUDA MENSAJE TIPO 62.....	96
FIGURA 138. AYUDA MENSAJE TIPO 63.....	97

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación

Desde que se empezaron a desarrollar, los sistemas de navegación por satélite son parte fundamental de muchas de las actividades que se realizan a diario para una gran variedad de usuarios. Desde la navegación más tradicional para establecer nuestra posición de forma estática, pasando por su inclusión en vehículos de uso personal, dispositivos deportivos, hasta aplicaciones que requieren de mucha mayor precisión como en aviación y otras aplicaciones más recientes como la agricultura de precisión.

Se trata de sistemas con una gran complejidad y que suponen la puesta en común de conocimientos de muchas ramas como son la aeronáutica, la física o las telecomunicaciones. De hecho, el sector aeroespacial presenta una gran cantidad de profesionales con el título de ingeniero de telecomunicaciones. En esta línea se hace fundamental la formación de los estudiantes de esta ingeniería en los conceptos de navegación por satélite. En la Universidad de Zaragoza existen multitud de asignaturas que se centran en el procesado de señal para este tipo de sistemas y otros muchos en general. De este modo el desarrollo de una herramienta de fácil manejo y comprensión, enfocada en el aprendizaje del funcionamiento de los sistemas de navegación por satélite permitirá al estudiante adquirir todos los conocimientos necesarios para poder desarrollarse profesionalmente en este sector.

Se ha desarrollado una herramienta (*GNSS Studio*) que permite el estudio, a través de una interfaz gráfica con muy buena usabilidad y con multitud de ayudas, de los sistemas de navegación por satélites como son los sistemas GNSS (Global Navigation Satellite System) o los sistemas SBAS (Satellite Based Augmentation System). *GNSS Studio* será empleada en varias asignaturas del grado y del master en Ingeniería de Telecomunicación en la Universidad de Zaragoza y podrá ser empleada en futuras asignaturas o también en otros grados o másteres.

## 1.2. Objetivos

Dada la complejidad de los sistemas de navegación por satélite, *GNSS Studio* tiene como objetivo acercar los conceptos más importantes de estos sistemas de una manera sencilla y fácilmente comprensible a los estudiantes. Además, de nuevo debido a la dificultad de estos sistemas, *GNSS Studio* podrá ser ampliada en el futuro añadiendo nuevas ventanas, opciones o herramientas para incluir otros conceptos que se consideren importantes dentro del ámbito de la navegación por satélite. Con el objetivo de hacer la comprensión de estos sistemas lo más fácil y accesible posible, incluirá también otras herramientas ya desarrolladas dentro de este campo como son *gLAB* [1], *SBAS Mentor* [2] o *SBAS Teacher* [3], herramientas de la Agencia Espacial Europea (ESA) también con objetivo didáctico y de software libre.

En su primera versión *GNSS Studio* centra sus objetivos en la comprensión de cuatro pilares básicos dentro de la navegación por satélite:

- I. Conceptos de sistemas de referencia temporales y sistemas de coordenadas, a través de la ventana de Tools.
- II. Información que gestionan los sistemas de navegación por satélite con el estudio de los ficheros RINEX (Receiver Independent Exchange Format), formato oficial de las medidas de los sistemas GNSS.
- III. Estudio de los sistemas GNSS a nivel de usuario con la herramienta *gLAB*.
- IV. Estudio de los sistemas de aumento SBAS.

A parte del propio desarrollo de las diferentes herramientas que componen *GNSS Studio* se ha considerado también importante facilitar el uso de la misma, para lo cual se ha desarrollado una interfaz gráfica con un nivel de usabilidad elevado, fácil manejo y que incluye una gran cantidad de ayudas en forma de ventanas emergentes con explicaciones teóricas o información complementaria, imágenes emergentes y enlaces a recursos interesantes para el estudio de estos sistemas. Además para facilitar su uso en ese ámbito académico se ha preparado una colección de ejercicios para realizar con *GNSS Studio* y que cubren todos los conceptos más importantes de navegación por satélite.

### 1.3. Organización de la memoria

Se detalla a continuación cual es la estructura y organización de este trabajo. En las primeras secciones se explica las diferentes herramientas y opciones que conforman *GNSS Studio*. Concretamente se han establecido cuatro secciones para cada uno de los puntos indicados en el apartado anterior. Dado el carácter didáctico de este trabajo se ha considerado fundamental hacer una propuesta unificada de ejercicios para realizar recorriendo todas las herramientas y conceptos fundamentales. Por último, en la sección de conclusiones y líneas futuras se presenta un resumen de los objetivos alcanzados con este proyecto y sobretodo se darán algunas ideas de cómo puede evolucionar *GNSS Studio* en el futuro para ser cada vez una herramienta más completa integrando una gran variedad de utilidades y posibilidades.

Con el objetivo de no recargar en exceso esta memoria, se han incluido en anexos diferentes capturas e imágenes que muestran como es la interacción con *GNSS Studio* así como algunas de las imágenes que se obtienen. El contenido de los anexos es el siguiente:

- Anexo I: Capturas e imágenes de la pestaña 'RINEX'
- Anexo II: Capturas e imágenes de la pestaña 'GLAB'
- Anexo III: Capturas e imágenes de la pestaña 'TOOLS'
- Anexo IV: Capturas e imágenes de la pestaña 'SBAS'

Para comprender mejor las explicaciones que se dan a lo largo de la memoria y especialmente en el apartado de ejercicios se sugiere ir consultando las imágenes de los anexos donde se detalla todo el proceso de uso de *GNSS Studio* paso por paso.

## 2. FICHEROS RINEX

En cualquier sistema tecnológico digital la gestión de la información es fundamental. El salvado de la información recopilada y la gestión de esa información empleando bases de datos, diferentes tipos de ficheros o formatos estandarizados se hacen de vital importancia especialmente conforme aumenta la complejidad del sistema. En el caso de GNSS la información que transmiten los satélites así como la recopilada por los receptores o estaciones en tierra son la base del funcionamiento de estos sistemas. De este modo se estableció el formato RINEX como formato oficial para guardar la información de navegación y las observaciones de los receptores para los sistemas de navegación por satélite. A pesar de que existen otros formatos también empleados, el formato RINEX es el más utilizado a nivel internacional y el que por tanto se ha considerado fundamental incluir en *GNSS Studio*.

RINEX (Receiver Independent Exchange Format) es un formato que ha evolucionado a lo largo del tiempo para adaptarse a las necesidades que han ido surgiendo, las nuevas constelaciones, nuevas frecuencias de funcionamiento etc. Actualmente la versión empleada es la 3.02. Como se ha mencionado, existen dos tipos fundamentales de ficheros RINEX: los de navegación, que guardan la información de navegación con los parámetros orbitales transmitida periódicamente por los satélites; y los ficheros de observaciones que incluyen las medidas de pseudorange (medidas de código), fase de la portadora, doppler y relación señal a ruido que miden los receptores en la superficie terrestre. Contienen pues toda la información necesaria para la correcta determinación de la posición de un receptor. Existen también otros tipos de ficheros RINEX como los SP3 que contienen la posición con alta precisión de los satélites a lo largo del tiempo, los ficheros RINEX con información ionosférica, los ficheros RINEX de reloj o los ficheros ANTEX con información sobre las antenas.

Dado que estos ficheros contienen la información básica de los sistemas de navegación por satélite su inclusión en la herramienta *GNSS Studio* ha sido una prioridad. La herramienta incluye un lector de ficheros RINEX que permite de una manera sencilla y con fácil usabilidad familiarizarse con este formato. Previamente al uso de la herramienta se aconseja profundizar más en la estructura de estos archivos. Se recomienda la consulta del siguiente enlace donde se detalla de manera interactiva la estructura de estos archivos para sus diferentes versiones: <https://gage.upc.edu/gFD/> [4].

La estructura genérica de los ficheros RINEX se compone de una cabecera (HEADER) que contiene información genérica como la versión RINEX, tipo de fichero RINEX así como información fundamental dependiente del tipo de fichero. Después se encuentran las medidas del fichero lo cual depende del tipo de RINEX. A continuación se revisa el caso de los tres tipos de RINEX más importantes.

### 2.1. Tipos de Archivos RINEX

#### 2.1.1. RINEX de Navegación

Contienen la información de los parámetros orbitales (efemérides) de los satélites que permiten al receptor determinar la posición de dicho satélite. Así conociendo la posición de

los diferentes satélites y calculando a la distancia a los mismos con las medidas de observación es posible determinar la posición del receptor. Conocida la posición de un satélite en un momento dado se puede saber cual será su posición en un momento futuro sabiendo la órbita que recorre. Sin embargo, existen efectos no lineales que provocan que la posición difiera ligeramente de la calculada teóricamente. Por este motivo los satélites incluyen en sus mensajes de navegación correcciones que se deben aplicar para obtener la posición real. Estas correcciones se envían cada dos horas y son las que se guardan en los RINEX de Navegación junto con los parámetros orbitales.

Así para cada intervalo de actualización de los parámetros encontramos una línea por satélite y una columna por cada parámetro orbital transmitido necesario para determinar la posición del satélite. En la Figura 1 se puede ver la estructura de este tipo de fichero.

**Versión RINEX**

**Fecha y hora** →

**Constelación y satélite** →

**Parámetros orbitales** →

3.02	N: GNSS NAV DATA	G: GPS	RINEX VERSION / TYPE
sbef2rin-9.3.3		20150103 000801 LCL	PGM / RUN BY / DATE
GPST 1.6764E-08 -7.4506E-09 -5.9605E-08 1.1921E-07			IONOSPHERIC CORR
GPSB 1.3517E+05 -1.8022E+05 6.5536E+04 0.0000E+00			IONOSPHERIC CORR
GPUT 0.000000000E+00 1.776356839E-15 61440 1826			TIME SYSTEM CORR
16			LEAP SECONDS
			END OF HEADER
G01	2015 01 01 22 00 00	-1.059472560883E-05 3.410605131648E-13 0.000000000000E+00	
	3.500000000000E+01	1.293750000000E+01 4.760555439100E-09 1.490232180301E+00	
	5.941838026047E-07	3.760420600884E-03 6.519258022308E-06 5.153666934967E+03	
	4.248000000000E+05	1.117587089539E-08 7.023947268169E-01 9.313225746155E-08	
	9.616493515497E-01	2.527500000000E+02 4.350484286219E-01 -8.152125283026E-09	
	4.218032840856E-10	1.000000000000E+00 1.825000000000E+03 0.000000000000E+00	
	2.000000000000E+00	0.000000000000E+00 5.587935447693E-09 3.500000000000E+01	
	4.176180000000E+05	4.000000000000E+00	
G02	2015 01 02 00 00 00	5.393708124757E-04 2.273736754432E-12 0.000000000000E+00	
	2.400000000000E+01	1.428125000000E+01 5.031995317089E-09 -3.071637232054E+00	
	6.947666406631E-07	1.412512711249E-02 6.670132279396E-06 5.153736995697E+03	
	4.320000000000E+05	3.725290298462E-09 6.679316055295E-01 -1.993030309677E-07	
	9.402701540946E-01	2.382187500000E+02 -2.348199707258E+00 -8.034620388475E-09	
	5.085926134952E-10	1.000000000000E+00 1.825000000000E+03 0.000000000000E+00	
	2.000000000000E+00	0.000000000000E+00 -2.048909664154E-08 2.400000000000E+01	
	4.248180000000E+05	4.000000000000E+00	

Figura 1. Estructura RINEX de navegación

### 2.1.2. RINEX de Observación

Contienen las medidas de pseudorango, fase de la portadora, doppler y relación señal a ruido que miden los receptores. Estas medidas son empleadas para determinar la distancia del receptor al satélite y posteriormente poder determinar la posición del receptor. Las medidas de pseudorango y de fase se obtienen correlando la señal recibida (que contiene un código PRN particular para cada satélite) con un código de referencia, lo que permite encontrar un pico de correlación que determina la distancia en metros o pseudorango (medidas de código) así como el número de ciclos de portadora (medidas de fase) que hay en el trayecto satélite-receptor.

Estas medidas contienen un gran número de errores que hay que tener en cuenta como la desviación de los relojes del satélite y receptor, los efectos ionosféricos y troposféricos, hardware *biases*, offset en las antenas etc. Por otro lado, como se verá en secciones futuras, los RINEX medidos por la estaciones en tierra son fundamentales para que los sistemas SBAS



puedan elaborar las correcciones pertinentes y estimar los efectos y errores mencionados para aumentar la precisión, continuidad, integridad y disponibilidad de estos sistemas.

En estos ficheros los receptores guardan periódicamente estas medidas para cada satélite que tienen a la vista. La frecuencia con la que guardan las medidas puede variar desde cada segundo, hasta frecuencias más bajas (cada 30 segundos). Así, por ejemplo para el caso de frecuencia de 1 herzio, para cada época habrá un bloque de líneas: una primera línea que indica la época en formato UTC seguida de una línea por cada satélite a la vista. La primera columna indica el satélite con una letra que se refiere a la constelación y un número que se corresponde con el satélite. El resto de columnas contienen las observaciones según se ha indicado en la cabecera del archivo. Se muestra en la Figura 2 la estructura de este tipo de RINEX.

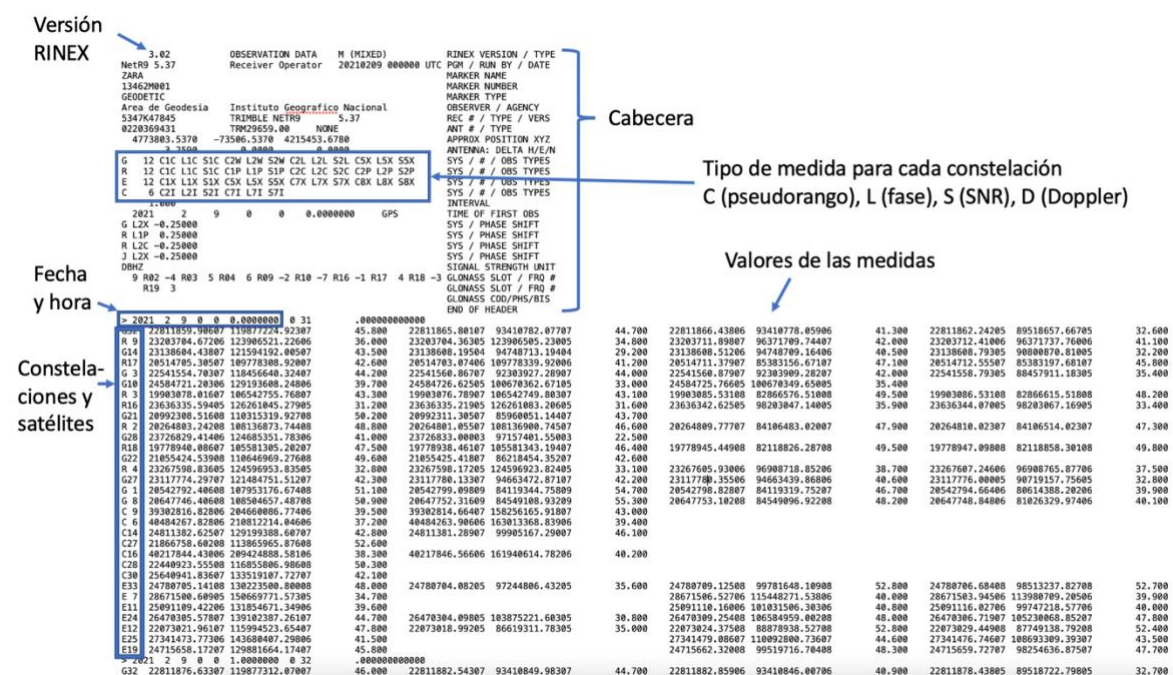


Figura 2. Estructura RINEX de observación

### 2.1.3. RINEX SP3

Contienen la posición de alta precisión de los satélites para diferentes instantes de tiempo. Para aplicaciones donde la precisión en el posicionamiento, así como otros parámetros como la integridad o continuidad tienen requerimientos más estrictos, el uso de órbitas precisas se hace necesario para conseguir alcanzar los requisitos de estos sistemas. Estos ficheros recogen la posición de los satélites en coordenadas ECEF (Earth Centered Earth Fixed), y opcionalmente su velocidad, con un grado de precisión mayor del que se puede lograr con las correcciones de los mensajes de navegación. En la Figura 3 se ve dicha estructura.



#cP2017	4	20	0	0	0.00000000	96	d+d	IGS14	FIT	AIUB
##	1945	345600.00000000	900.00000000	57863	0.000000000000					
+	56	G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17								
+		G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32R01R02								
+		R03R04R05R06R07R08R09R10R11R13R14R15R16R17R18R19R20								
+		R21R22R23R24R26	0	0	0	0	0	0	0	0
+		0	0	0	0	0	0	0	0	0
++		4	4	4	4	4	4	4	5	6
++		4	4	4	4	6	4	4	8	4
++		5	5	5	4	4	4	4	4	4
++		4	4	4	6	7	0	0	0	0
++		0	0	0	0	0	0	0	0	0
%c	M	cc	GPS	ccc	cccc	cccc	cccc	cccc	cccc	cccc
%c	cc	cc	ccc	ccc	ccc	ccc	ccc	ccc	ccc	ccc
%f	1.25000000	1.025000000	0.0000000000	0.000000000000	0.00000000000000					
%f	0.00000000	0.000000000	0.0000000000	0.000000000000	0.00000000000000					
%i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
/* Center for Orbit Determination in Europe (CODE)										
/* Final GNSS orbits and GPS clocks for year-day 17110										
/* Note: Middle day of a 3-day arc GPS/GLONASS solution										
/* PCV:IGS14 OL/AL:FES2004 NONE YN ORB:CoN CLK:CoN										
*	2017	4	20	0	0	0.00000000				
PG01	15010.116121	-1938.445044	21732.289019	53.528626						
PG02	-14471.125451	-19489.742499	-10653.846643	436.072124						
PG03	21568.605905	-10874.950279	11013.903467	-103.803084						
PG04	-92.859410	18166.821547	-19502.467797	1.645114						
PG05	-13612.511656	-8084.242696	-21427.064047	-49.867595						
PG06	-6020.891798	-25809.691616	1651.683397	340.158242						
PG07	9158.945128	-16321.336451	-18504.145790	360.543716						
PG08	26022.382012	5349.040990	1599.209781	-56.860931						
PG09	14983.703494	-10397.397777	-19338.224993	346.379714						
PG10	-6267.414478	21149.058956	14741.185018	-72.709570						
PG11	19461.673494	2609.187500	17301.908955	-682.490428						
PG12	-21092.004570	6115.123156	14621.630775	385.160940						
PG13	-22912.046102	-12493.310274	-4915.083239	-78.662440						
PG14	11104.711393	16809.348214	17658.729714	-67.572850						
PG15	-26360.554385	-1803.268901	4071.000370	-348.234428						
PG16	11967.405235	8859.437357	-22150.036342	31.684595						
PG17	-1569.947688	-15744.783011	21714.451607	-183.248619						
PG18	-13287.169060	22077.457629	6548.120011	611.364311						
PG19	-9605.892430	-16487.386021	18082.072278	-506.569107						
PG20	-20706.391787	7820.579906	-14824.020083	468.982639						
PG21	-3924.896413	21624.631834	-14036.966745	-511.478291						
PG22	20039.957956	-2411.922676	17544.334735	35.970534						
PG23	24207.060597	-2107.679226	-10994.760883	-210.157035						
PG24	-16138.444729	-798.578478	12027.793271	-33.612921						
PG25	-19654.544353	17495.434907	2436.168170	-373.003697						
PG26	3463.373855	16850.624135	-20216.881552	-512.063989						
PG27	21381.380403	12447.705984	-9996.285291	99999.999999						
PG28	10441.999388	-20745.158876	13511.491059	606.308284						
PG29	-17914.673272	7082.810457	-18272.738597	611.196866						
PG30	1028.633839	-25035.177298	-8622.346473	158.630720						
PG31	6382.013665	25556.435641	-287.459599	206.183870						
PG32	2860.813002	15970.202614	21052.302136	-390.043441						

Figura 3. Estructura RINEX SP3

## 2.2. Adquisición de ficheros RINEX

Una ventaja de los ficheros RINEX es su fácil acceso para labores educativas. Dado que es un formato estandarizado, cualquiera puede guardar en formato RINEX las observaciones que mide con un receptor GNSS. Así existen numerosas universidades, centros de investigación o particulares por todo el mundo que contribuyen a una base de datos de acceso libre. Paralelamente y como se verá en secciones posteriores los sistemas SBAS tiene sus propias estaciones terrenas de uso exclusivo con receptores con mucha mayor precisión y cuyo ficheros RINEX no son de acceso libre.

Como parte del aprendizaje con *GNSS Studio* se sugiere la investigación propia de fuentes donde poder acceder a ficheros RINEX y analizar cual es su procedencia dado que como es evidente la calidad del receptor (antena, componentes de radiofrecuencia etc.) afectará directamente a la precisión en la determinación del posicionamiento. Para facilitar la adquisición de ficheros RINEX se presentan a continuación tres fuentes de fácil acceso:

- Existe una web (<http://www.epncb.oma.be>) del Real Observatorio de Bélgica donde se detalla la información de la 'EUREF Permanent GNSS Network'. Se trata de una red de estaciones GNSS de referencia por toda Europa que opera en tiempo real actualmente y a la que se puede acceder para obtener los ficheros RINEX de observación generados por dichas estaciones. El número de estaciones es muy

elevado lo que supone una ventaja y la descarga de ficheros RINEX en la versión 3.02 es muy sencilla.

- A nivel nacional español tenemos el Instituto Geográfico Nacional que en su página web (<https://www.ign.es/web/ign/portal/gds-gnss-datos-rinex>) también permite el acceso a los ficheros RINEX de un gran número de estaciones con frecuencias de 1 o 30 segundos, así como a los ficheros de navegación para las constelaciones principales.
- La NASA también tiene su propia base de datos (<https://cddis.nasa.gov/index.html>) accesible fácilmente solo con la creación de un usuario. Se pueden descargar tanto ficheros de observación, como de navegación, SP3 y otros.

Ambas fuentes permiten la selección de la estación, frecuencia de las medidas, fecha e intervalo horario de los RINEX etc. Los ficheros de observación descargados de estas fuentes así como de otras muchas normalmente se obtienen en formato CRX (Hatanaka Compressed RINEX). Se trata de un formato comprimido desarrollado específicamente para ficheros RINEX. La herramienta *GNSS Studio* incluye en la pestaña de 'Tools' un apartado que permite la compresión y descompresión de este formato, es decir, permite el paso de ficheros .crx a .rnx y viceversa. Así se facilita la obtención de los ficheros en formato .rnx que se emplean en la pestaña de 'RINEX' para su análisis.

Además de la descarga de los archivos RINEX de las diferentes fuentes propuestas, se plantean otras alternativas para obtener otros ficheros. La propia aplicación *GNSS Studio* incluye una pequeña base de datos con ficheros RINEX ya descargados por si hubiera algún problema con la descarga de los mismos. Sin embargo, para una mayor comprensión e interactividad en el aprendizaje sobre este formato se sugiere la generación de estos archivos empleando una aplicación móvil disponible para dispositivos Android. Se trata de la aplicación 'Geo++ RINEX Logger' que permite desde un Smartphone la generación en tiempo real de ficheros RINEX con los datos que el receptor GNSS del móvil recibe. Para ello el dispositivo debe permanecer en un espacio exterior y abierto, sino la captación de las señales GNSS no será buena. Esta opción de obtención de ficheros RINEX además permite ver que constelaciones GNSS se reciben lo que dependerá en gran medida del receptor del dispositivo móvil.

### 2.3. Visualización en GNSS Studio

El objetivo de incluir los lectores RINEX en *GNSS Studio* es permitir una visualización gráfica de los mismos para poder entender de manera sencilla cual es su significado y su importancia. En la Figura 4 se muestra la ventana 'RINEX' de *GNSS Studio*. En la sección de ejercicios (6.1) y en el ANEXO I: CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA 'RINEX' DE GNSS STUDIO se muestran más imágenes de las ayudas y gráficas que se pueden obtener.

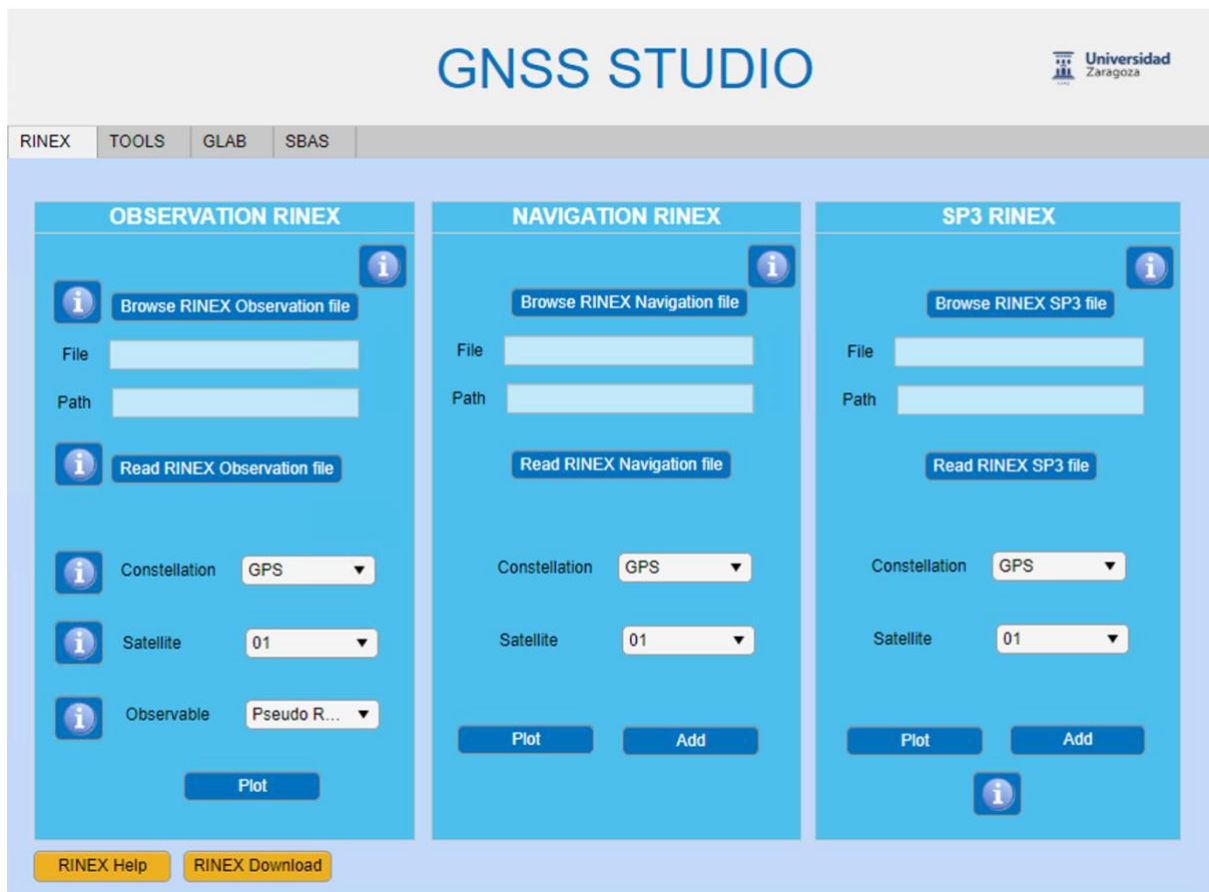


Figura 4. Ventana 'RINEX' de GNSS Studio

- En el caso de los ficheros de observación se sugiere obtener ficheros RINEX para días completos y dibujar la evolución de las diferentes medidas durante las 24 horas del día. Así se podrá ver que tanto para las medidas de fase como para las de código (pseudorange) (Figura 5 y Figura 6) existe una evolución en forma de parábola que se corresponde con la traslación de los satélites alrededor de la tierra. En ambos casos la distancia en metros y el número de ciclos completos entre el satélite y el receptor comienza siendo mayor, se reduce hasta el punto en que el satélite pasa perpendicular al punto de la tierra donde se encuentra el receptor y vuelve a aumentar hasta que desaparece en el horizonte. Además dependiendo de la latitud del receptor y de la inclinación de la órbita del satélite la forma de las parábolas variará.

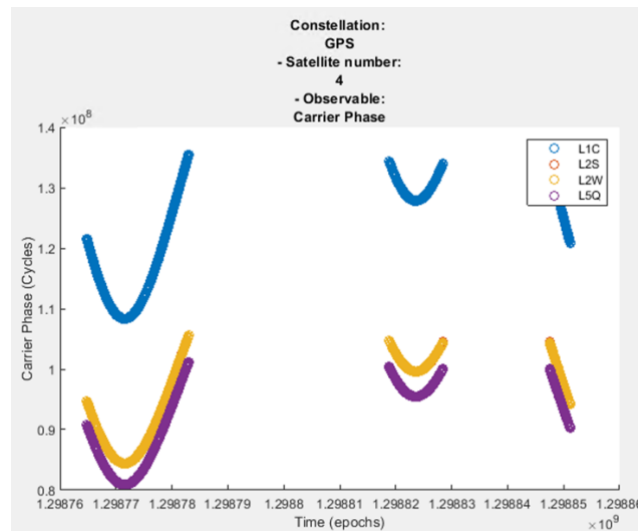


Figura 5. Ejemplo medida de fase para receptor en A Coruña

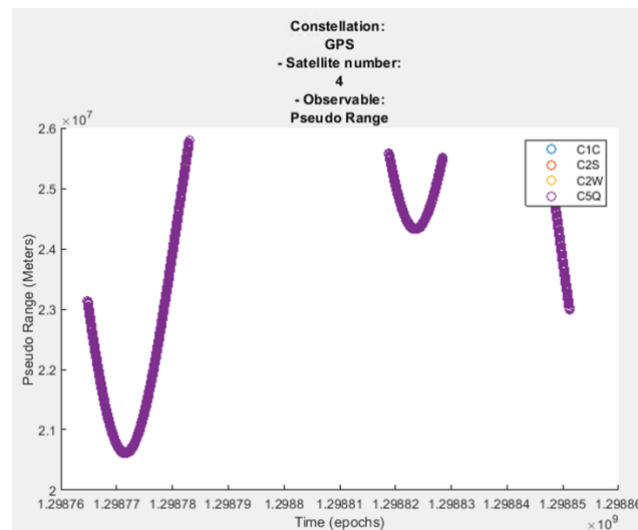


Figura 6. Ejemplo medida de pseudorange para receptor en A Coruña

Se puede apreciar además en las medidas de SNR (Figura 7) que la parábola está invertida, dado que la SNR es mayor cuando el satélite se encuentra en ángulos de elevación grandes y menor cuando el satélite se encuentra en el horizonte como se ve en el cuadrado verde (ángulos de elevación pequeños). Esto es así no solo por la mayor distancia sino fundamentalmente porque la señal del satélite recorre mayor distancia atravesando la ionosfera o la troposfera y los efectos degradantes de las mismas adquieren mayor peso. Se observa además que hay dos pasos del satélite por encima del receptor, lo que se debe a que la frecuencia de rotación de los satélites GNSS alrededor de la tierra es de aproximadamente doce horas (círculos rojo y azul). Esto también se ve en el resto de medidas.

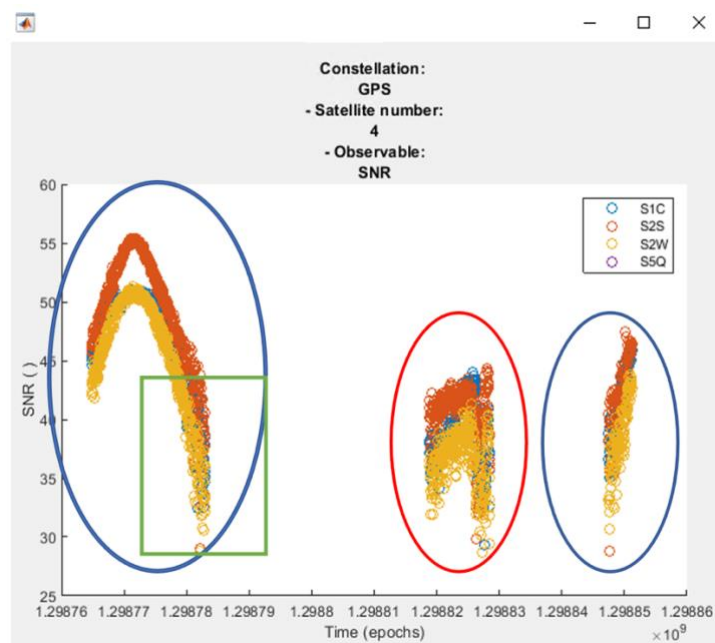


Figura 7. Ejemplo evolución de las medidas de SNR receptor en A Coruña

Para ver más imágenes y el proceso paso por paso para obtenerlas consultar I.A. RINEX DE OBSERVACIONES.

- Para los ficheros de navegación se puede hacer un estudio similar de los parámetros orbitales, efemérides y correcciones. En el cuadro de lectura de ficheros RINEX de navegación podemos procesar estos archivos en su versión 3.02. Se ha implementado además de la lectura de estos ficheros el procesado de los mismos para obtener la evolución en la posición de los satélites a lo largo del tiempo en coordenadas ECEF y ECI (Earth Centered Inertial) a partir de los parámetros orbitales y correcciones de los mismos. Así se pueden dibujar las órbitas y trazas de los satélites a partir de los ficheros de navegación. Las trazas muestran el paso de los satélites por la superficie de la tierra en un plano 2D que permite ver claramente como es su paso en una forma similar a la sinusoidal. Se puede ver un ejemplo en la Figura 8. Para ver más imágenes y el proceso paso por paso para obtenerlas consultar I.B. RINEX DE NAVEGACIÓN.

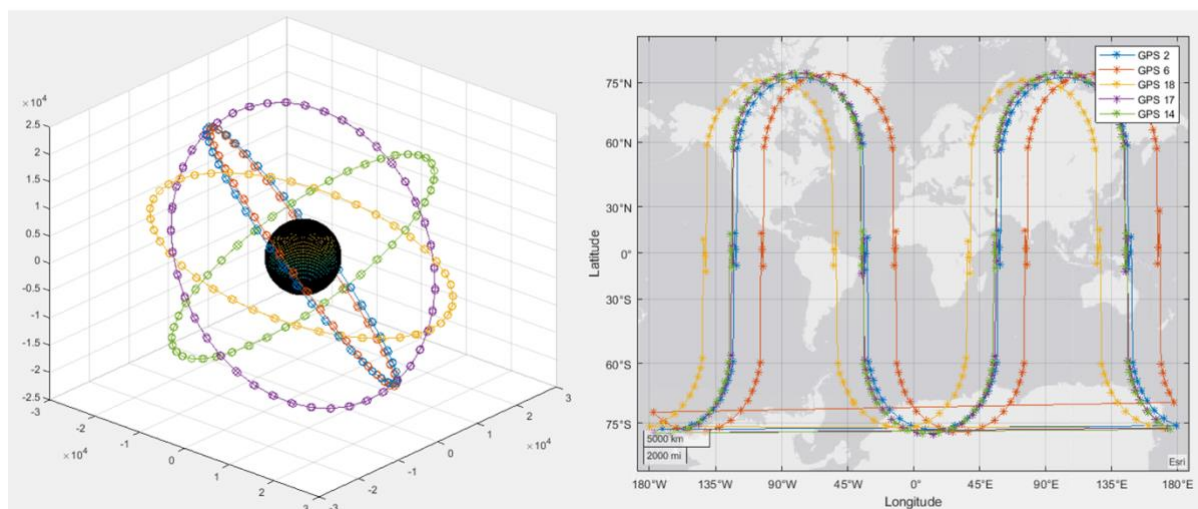


Figura 8. Órbitas y trazas de satélites GPS a partir de RINEX de navegación

- Se ha incluido también un lector de ficheros SP3. Estos ficheros incluyen la posición con alta precisión de los satélites en cada instante de tiempo. Pueden tener diferente frecuencia de actualización y proporcionan una mayor precisión que la que se obtienen a partir de los ficheros RINEX de navegación. En estos ficheros se incluye la posición de los satélites en coordenadas ECEF y en muchos casos también su velocidad para diferentes instantes de tiempo. Con el objetivo de poder visualizar las órbitas de los satélites de las diferentes constelaciones y sus trazas, *GNSS Studio* permite procesar estos ficheros y dibujar las órbitas y trazas haciendo conversiones de ECEF a ECI y de ECEF a LLA (Longitude Latitude Altitude) respectivamente, como se ve en la Figura 9. Para ver más imágenes y el proceso paso por paso para obtenerlas consultar I.C. RINEX SP3.

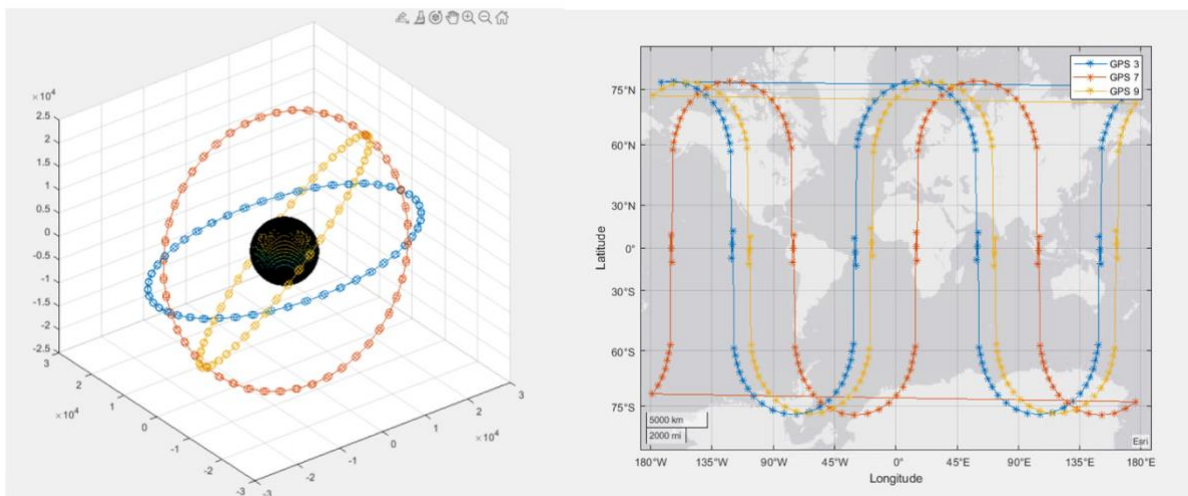


Figura 9. Órbitas y trazas de satélites a partir de SP3



### 3. GLAB

Uno de los principales objetivos de este trabajo es lograr una herramienta lo más completa posible para que pueda cubrir todos los aspectos de GNSS. Para ello se ha considerado fundamental aprovecharse de alguna herramienta de software libre ya desarrollada para la enseñanza académica (o incluso profesional) de sistemas GNSS. Además para acercar y facilitar más el acceso y conocimiento de estas herramientas se van a incluir como parte de la herramienta *GNSS Studio* para que puedan ser ejecutadas con mucha facilidad, y adicionalmente, se van a incluir ventanas de ayuda para que el uso de las mismas sea inmediato y con una curva de aprendizaje muy breve.

La Universidad Politécnica de Cataluña desarrollo (y sigue actualizando a día de hoy) para la Agencia Espacial Europea (ESA) la herramienta *gLAB*. Se trata de una herramienta de aprendizaje para sistemas GNSS que ofrece una gran variedad de posibilidades diferentes. Así una de las ventanas de *GNSS Studio* tendrá un acceso a *gLAB* y una serie de ayudas para su uso. Se incluyen a continuación los detalles al respecto.

*gLAB* es una herramienta con características propias de software avanzado en procesado de datos GNSS. Permite el estudio de señales de posicionamiento de alta precisión ‘High-accuracy’. De este modo permite un modelado preciso de las medidas GNSS (tanto código como fase de la portadora) hasta nivel de centímetro, permitiendo posicionamiento preciso (PPP). Además permite el procesado de diferentes archivos como son los RINEX, SP3, ANTEX o SINEX.

Para abrir *gLAB* desde *GNSS Studio* simplemente será necesario hacer clic en el botón de ‘Launch *gLAB*’ en la ventana de *gLAB*. En el caso de que se esté trabajando con macOS *gLAB* deberá estar previamente instalado en el sistema [1]. Se detallan a continuación el funcionamiento de las ventanas principales de *gLAB*. En la sección de ejercicios prácticos (6.3) se plantean una serie de tareas que se pueden hacer con *gLAB* para facilitar el estudio de diferentes conceptos de GNSS.

#### 3.1. Input

En esta ventana se lleva a cabo la selección de los ficheros de entrada que se van a procesar y analizar. Lo primero y fundamental es la selección de los ficheros RINEX de observación y navegación que ya se han podido estudiar en detalle en la sección de RINEX de *GNSS Studio*. Además permite la selección de hora de inicio y fin en caso de que no se desee procesar los ficheros por completo. En el caso de los ficheros de navegación se permiten tres opciones:

- Broadcast. Fichero RINEX de navegación normal con las efemérides para los diferentes satélites.
- Precise 1. Fichero SP3 que contiene información precisa de las órbitas de los satélites.
- Precise 2. Además del fichero SP3 se facilita un fichero de relojes que contiene correcciones en los relojes tanto de los receptores como de los satélites que se hace necesario cuando se quiere que la precisión del posicionamiento sea muy alta.

Se puede también proporcionar un fichero tipo ANTEX que contiene información sobre las antenas de los receptores y los satélites. Concretamente contiene correcciones dado que

existen diferentes puntos de referencia en la antena receptora que han de tenerse en cuenta cuando se quiere una precisión elevada. Estas correcciones son offsets de los centros de fases de las antenas (Antenna Phase Center Offset) y variaciones de los centros de fase (Phase Center Variations).

Como opciones más avanzadas permite también el uso de correcciones adicionales como las que facilitan los sistemas DGPS (Differential GPS) o sistemas SBAS. Así, se pueden seleccionar también ficheros SBAS que contienen las correcciones de estos sistemas de aumentación, ficheros RINEX de estaciones de referencia cercanas a los RINEX que ha procesado el usuario para DGPS o ficheros IONEX que contienen correcciones ionosféricas como las que pueden facilitar los sistemas SBAS. Todo esto se explica con ayudas en *GNSS Studio* como se ve en la Figura 10.

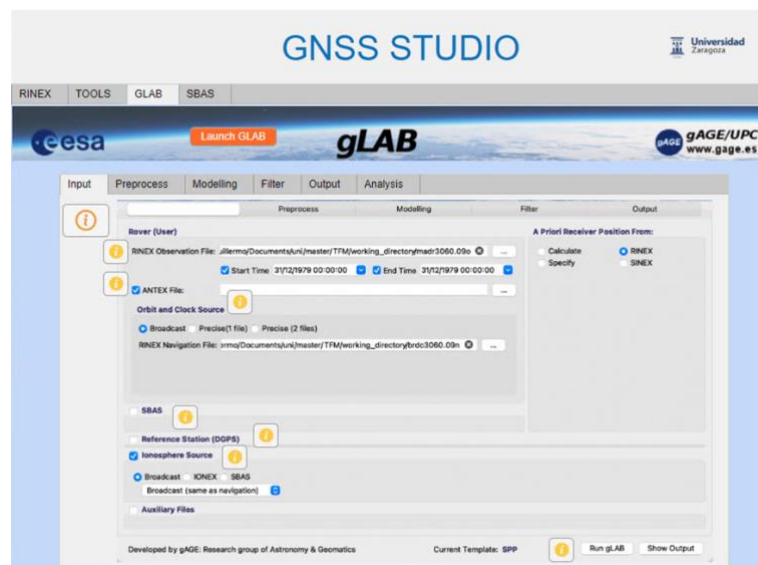


Figura 10. Ayuda gLAB Input en GNSS Studio

Una vez se han seleccionado todos los archivos de entrada deseados haciendo clic en el botón 'Run gLAB' se lleva a cabo el procesamiento de los mismos para obtener los resultados y análisis. Este procesamiento genera un archivo 'gLAB.out' que contiene todo el procesamiento que se ha indicado que se debe generar en la ventana de 'Output'. Para analizar los resultados se deberá acceder a la ventana 'Analysis'.

### 3.2. Preprocess

En esta ventana (Figura 11) se pueden seleccionar diferentes opciones relativas al preprocesado de los datos GNSS. El preprocesado se refiere a todas las modificaciones que se hacen de los datos de entrada (en este caso los ficheros RINEX) previamente a la realización de los cálculos principales y que tienen como objetivo adecuar los datos de entrada según las necesidades. Algunas de las opciones disponibles:

- Detección de saltos de ciclo. Un salto de ciclo ocurre cuando un receptor pierde el tracking de las señales de fase y se reengancha. Dado que existe una ambigüedad de N veces la longitud de onda de la señal el receptor puede introducir un salto de ciclo



en las medidas. Cuando la presencia de estos saltos es frecuente su detección y reparación es fundamental. *gLAB* permite seleccionar diferentes métodos de reparación del salto de ciclo.

- Opciones de satélite. Permite establecer un ángulo de elevación mínimo (Elevation Mask) para tener en cuenta la señal recibida de un satélite. Esto es interesante dado que los satélites en elevaciones bajas suelen presentar mayores errores ionosféricos y degradaciones por multipath. Se puede prescindir también de satélites en eclipse o con algún flag que indique que su estado de ‘salud’ no es aceptable.
- Selección de satélites a procesar. Permite seleccionar que satélites y constelaciones procesar y cuales no.

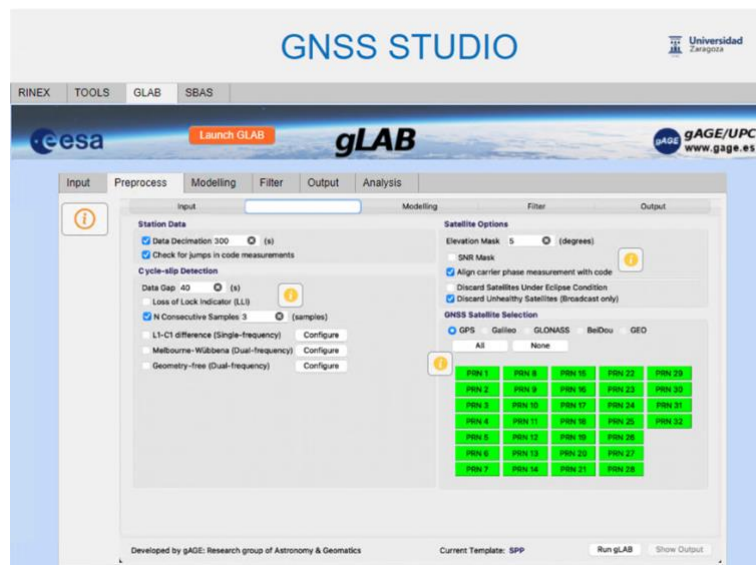


Figura 11. Ayuda *gLAB* Preprocessing en *GNSS Studio*

### 3.3. Modelling

Contiene las opciones relativas a cual es el modelado que emplearía el usuario a la hora de procesar los datos de entrada en lo que se refiere a diferentes algoritmos que permiten calcular los efectos de la ionosfera, troposfera, efecto relativista del reloj del receptor, wind-up, offset de las antenas transmisora y receptora etc. (ver Figura 12). Dado que se tratan de conceptos más avanzados se sugiere dejar los valores por defecto a no ser que se desee profundizar en alguno de estos algoritmos en concreto [5], [6], [7].

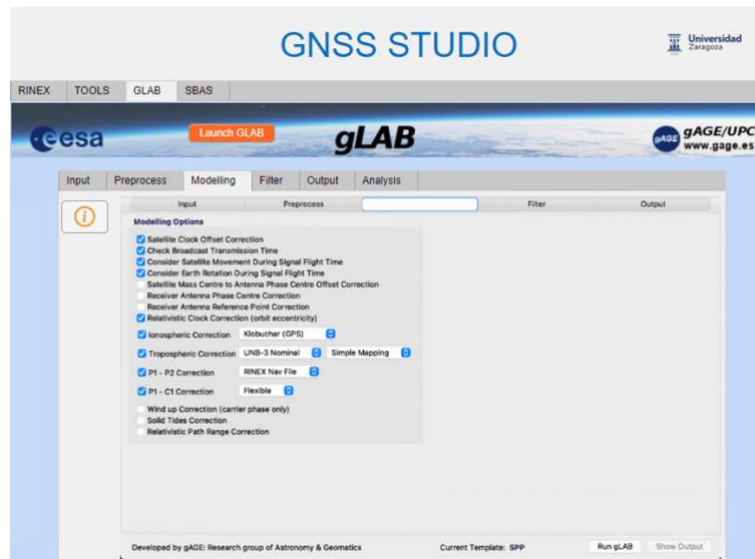


Figura 12. Ayuda gLAB Modelling en GNSS Studio

### 3.4. Filter

Selección de opciones relativas al uso de unos tipos de medidas u otros (Figura 13). Algunas de las opciones disponibles en esta ventana son:

- Selección de las medidas a emplear en el cómputo de la posición. Permite seleccionar solo las medidas de pseudorango o incluir también las medidas de fase. Se puede activar el suavizado (smoothing) de las medidas de pseudorango con las medidas de fase que son más precisas. Las medidas de fase no se pueden utilizar solas debido a la ambigüedad de fase. Existe la opción de seleccionar unas medidas de código y fase u otras (unos canales u otros) según se desee.
- Selección de modo 'single-frequency' o 'dual-frequency'. Se trata de una opción interesante dado que el uso de dos frecuencias (si están disponibles) facilita y mejora las prestaciones de los algoritmos que predicen efectos dependientes de la frecuencia como el error ionosférico, los hardware biases etc.
- Estado del receptor. Permite seleccionar si el receptor es estático o dinámico. Si se conoce que el receptor es estático conviene seleccionar dicha opción dado que la posición se procesa como constantes y así se obtienen errores mucho menores como se ve en el anexo III.B. IMÁGENES GLAB DE LA SECCIÓN DE EJERCICIOS.

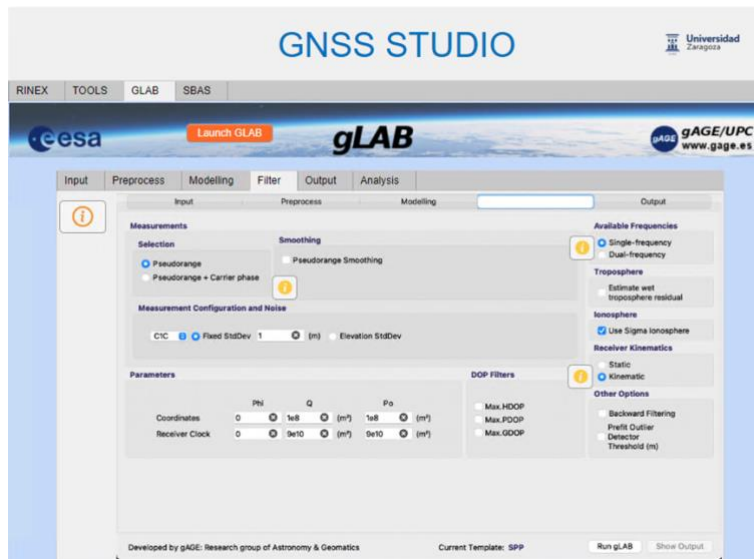


Figura 13. Ayuda gLAB Filter en GNSS Studio

### 3.5. Output

En esta ventana (Figura 14) se pueden seleccionar que salidas y cuales se desean activar para el procesado que realiza gLAB. Se sugiere que se dejen seleccionadas las opciones que vienen por defecto.

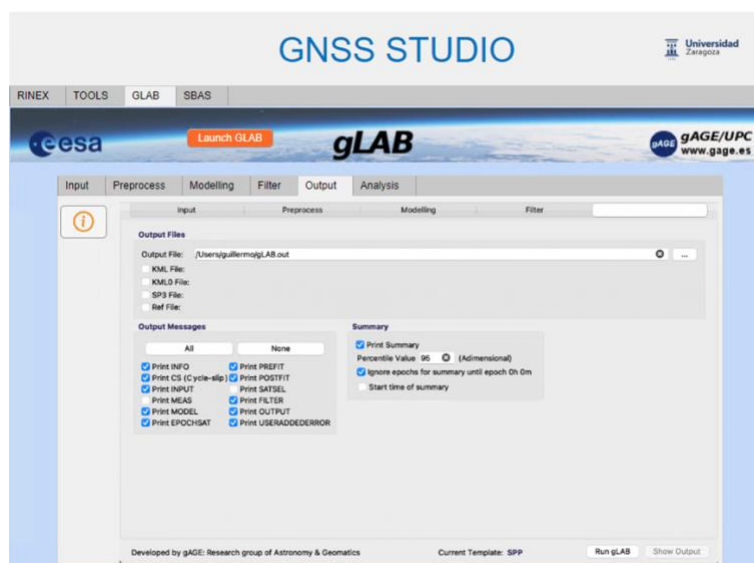


Figura 14. Ayuda gLAB Output en GNSS Studio

### 3.6. Análisis

En esta ventana (Figura 16) se procesan los resultados generados en el archivo 'gLAB.out' para generar gráficas donde poder analizar los resultados obtenidos. gLAB permite sacar una gran cantidad de gráficas de análisis. A continuación se detallan las más importantes y que se deberían incluir en posibles prácticas de laboratorio que se pudieran desarrollar:

- NEU Positioning Error. Se trata del error en el posicionamiento a lo largo del tiempo en coordenadas NEU (North-East-Up). Por tanto muestra tres líneas diferentes para cada una de las tres coordenadas con el nivel de error con el que se hicieron las mediciones del RINEX de observación que se ha procesado.
- Horizontal Positioning Error. Muestra el error en el plano horizontal, es decir, solo las coordenadas North-East.
- Dilution of Precision (DOP). Medida muy importante de la calidad del posicionamiento en función de la geometría de los satélites. Cuando los satélites a la vista están más cerca entre si relativamente con respecto al usuario la ambigüedad en el posicionamiento es mucho mayor dado que el área donde se pueden encontrar el usuario es mucho mayor (Figura 15). Esto implica que en escenarios con poca visibilidad (como en entornos urbanos con edificios altos) donde los satélites a la vista se sitúan justo encima del receptor todos con una elevación similar, el error en el posicionamiento y el DOP serán mucho mayores.

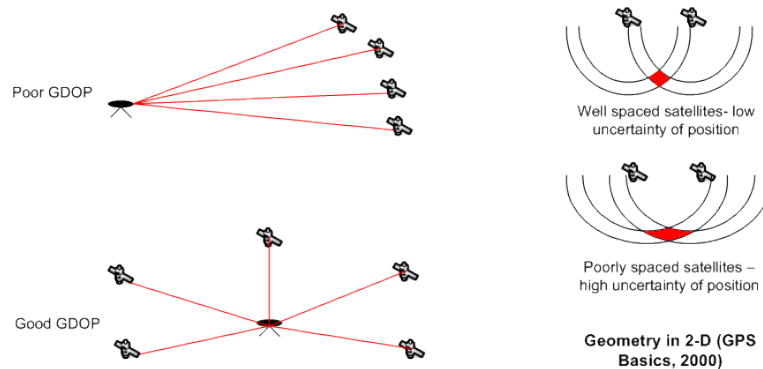


Figura 15. Dilution Of Precision (DOP)

- Satellite Skyplot. Muestra el paso de los satélites en el rango de visibilidad del receptor que se ha procesado. Es interesante probar con diferentes usuarios/receptores situados en diferentes puntos de la tierra para ver las diferencias, por ejemplo con un receptor muy cerca de los polos norte o sur por donde los satélites no llegan a pasar.

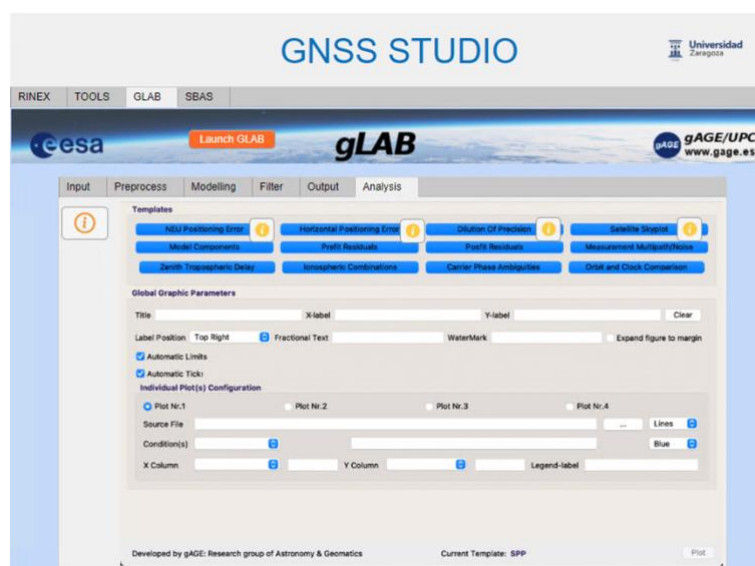


Figura 16. Ayuda gLAB Analysis en GNSS Studio

En la Figura 17 se muestran algunas de estas figuras que se obtienen con *gLAB* para un receptor en Madrid a lo largo de 24 horas. Para ver más ejemplos concretos consultar la sección de ejercicios (6.3) y el anexo correspondiente (III.B. IMÁGENES GLAB DE LA SECCIÓN DE EJERCICIOS).

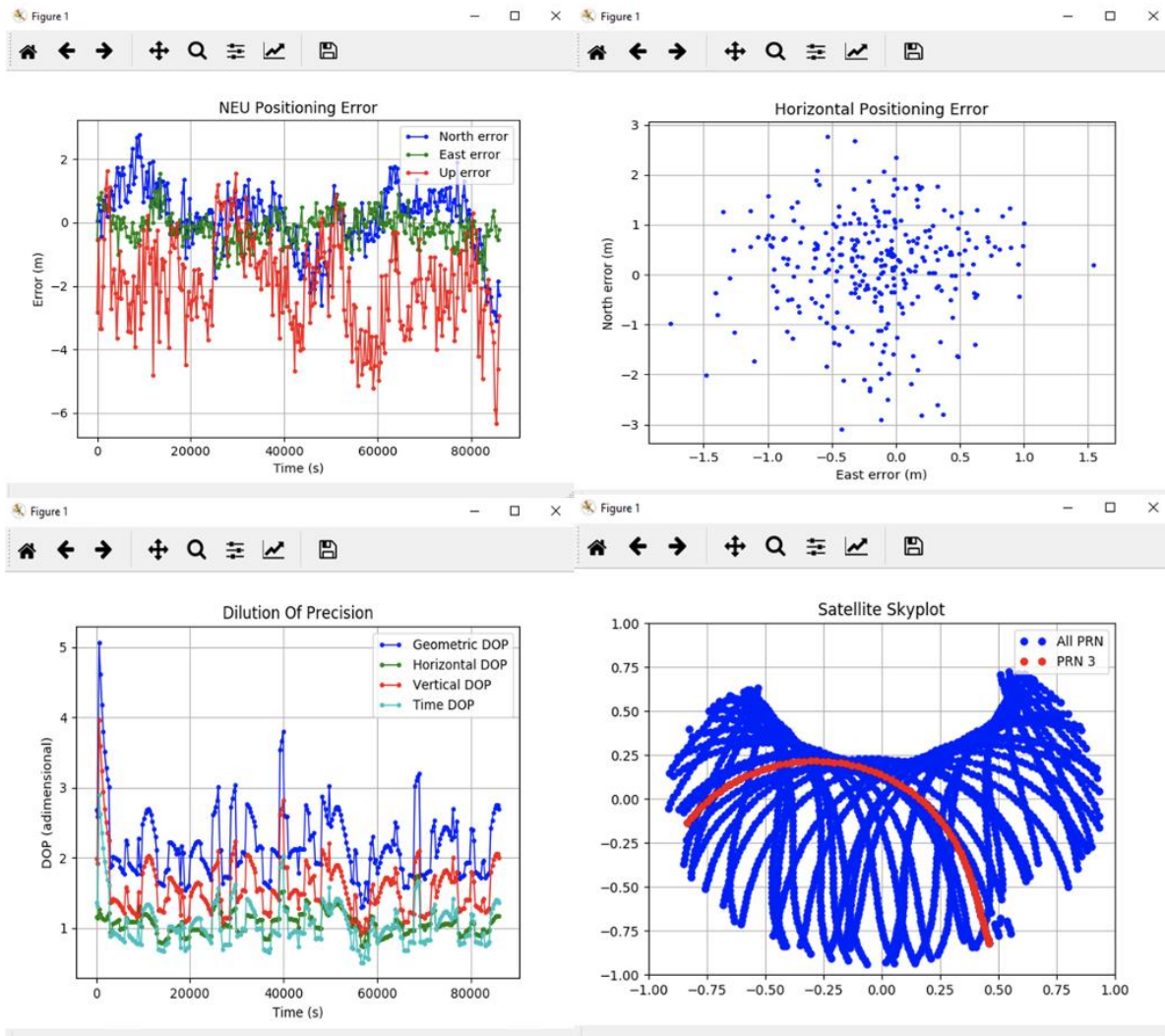


Figura 17. Ejemplos figuras *gLAB*. Error en el posicionamiento NEU, horizontal, Dilution Of Precisión y Skyplot

## 4. SBAS

Las prestaciones de los sistemas GNSS como GPS, Galileo, GLONASS o Beidou son sin duda suficientes en una extensa variedad de aplicaciones. Sin embargo, existen otros usos en los que se exigen unos niveles de fiabilidad mucho más estrictos y que crearon la necesidad de desarrollar otras soluciones complementarias a las constelaciones GNSS. Existen diferentes tipos de factores que ocasionan la degradación de la señal como puede ser la calidad del hardware o la precisión de los relojes de los satélites y los receptores. Estos factores pueden solucionarse empleando tecnologías punteras y de gran precisión. Sin embargo, existen otros factores como el efecto de la ionosfera, el efecto de la troposfera o el multipath que no pueden ser modificados. La única solución para tratar estas degradaciones es con la estimación de su efecto para poder cancelarlo en la medida de lo posible. Así es como nacen los sistemas de aumentación (o aumento), cuyo principal objetivo es mejorar las prestaciones de los sistemas GNSS con mediciones y algoritmos más complejos. Por la importancia de este tipo de sistemas especialmente en aplicaciones de 'Safety of Life (SoL)' se ha considerado importante incluir ciertas herramientas didácticas para permitir el aprendizaje de, por lo menos, los conceptos básicos de estos sistemas.

### 4.1. Tipos de sistemas de aumentación

La aplicación fundamental de este tipo de sistemas es la aviación tanto civil como militar, dado que, como se detallará más adelante, los requerimientos y prestaciones son muy exigentes por el riesgo en la integridad de las personas. Existen fundamentalmente tres tipos de sistemas de aumentación:

- Satellite Based Augmentation Systems (SBAS) [8]. Se basan en una red de estaciones terrestres que monitorizan la señales GNSS para después procesar toda esa información y computar correcciones (en cuanto a parámetros ionosféricos, troposféricos, en la posición de los satélites etc.) que son enviadas a uno o varios satélites geoestacionarios que reenvían (broadcast) esas correcciones sobre un área concreta (normalmente un continente) para que los receptores puedan procesar esas correcciones y mejorar las prestaciones en el posicionamiento. Los principales sistemas SBAS son WAAS en EEUU, EGNOS en Europa o GAGAN en India, aunque actualmente se están desarrollando otros muchos SBAS para otras localizaciones.
- Ground Based Augmentation Systems (GBAS) [9]. A diferencia de los SBAS (que se emplea en áreas muy extensas como un continente completo), GBAS se utiliza para alguna aplicación concreta y en un entorno concreto como un aeropuerto. Utilizan una o varias antenas terrenas que monitorizan las condiciones en un área reducida y computan las correcciones enviándolas directamente con una antena parabólica al receptor (el avión). Son sistemas empleados fundamentalmente para el aterrizaje (y despegue) de aviones.
- Aircraft Based Augmentation Systems (ABAS). En ausencia de sistemas más complejos como los SBAS o GBAS, ABAS es una alternativa que no precisa de elementos externos al propio receptor. Se basa en la inclusión de más sensores en el receptor o de la utilización de algoritmos de mayor complejidad para la elaboración de correcciones. Los sistemas de este tipo más extendidos son los RAIM (Receiver Autonomous



Integrity Monitoring) que emplean la redundancia de señales GNSS (monitorizan más satélites de los 4 estrictamente necesarios) para asegurar la integridad de las señales recibidas descartando aquellas que se consideren erróneas o corruptas.

#### 4.2. Infraestructura SBAS

Para entender como se genera toda esta información adicional a los sistemas GNSS y como esta información es difundida a los usuarios del SBAS se indican de forma breve cuales son los elementos de este tipo de sistemas (Figura 18) [10]:

- Estaciones terrenas (*Reference Stations*). Se ocupan de recopilar las medidas de las constelaciones GNSS como lo haría un receptor normal. Cuanto más extensa sea la red de estaciones mejores serán las correcciones que el sistema SBAS genera. Concretamente y dado que los sistemas SBAS generan dos tipos de correcciones:
  - Para las correcciones en las órbitas y los relojes de los satélites es conveniente que la red tenga estaciones por todo el mundo para poder tener una buena monitorización de los satélites en todo momento.
  - Para las correcciones ionosféricas es suficiente con tener estaciones en la zona o área geográfica donde se va a hacer uso del SBAS.
- Centro de procesamiento central (*Master Station*). Todas las estaciones terrenas envían las medidas recopiladas a este punto central donde se procesan todos esos datos. Es el núcleo del SBAS y donde se generan todas las correcciones propias del SBAS.
- Antenas transmisoras (*Uplink Stations*). Envían las correcciones que ha generado el centro de procesamiento central con unas antenas parabólicas a los satélites geoestacionarios.
- Satélites geoestacionarios. Al encontrarse en órbita geoestacionaria están siempre sobre el área donde se hace uso del SBAS. Reciben los mensajes con las correcciones y los retransmiten al área de servicio en broadcast para que todos los usuarios puedan recibir las correcciones.

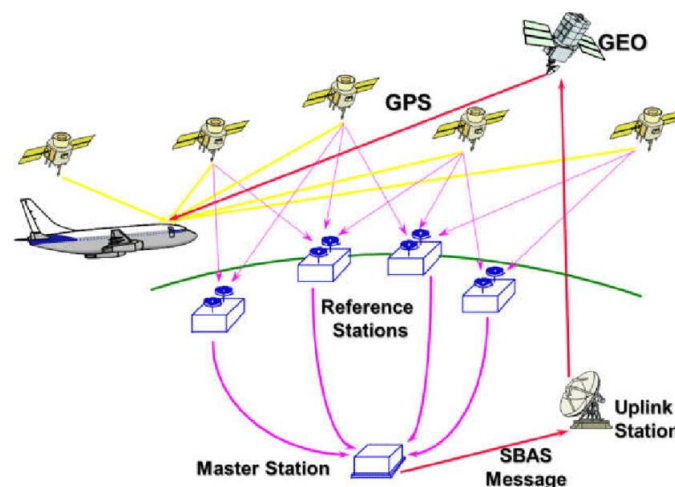


Figura 18. Estructura de un sistema SBAS

### 4.3. Conceptos básicos SBAS

Una idea fundamental en los sistemas de aumentación es entender que es lo que pretenden mejorar [10], [11]. Los sistemas de aumentación buscan obtener mejoras en cuatro parámetros:

- **Integridad (Integrity)** [12]. La integridad se refiere a la capacidad de un sistema de detectar señales que no son fiables (ya sea por degradaciones ambientales, de hardware o humanas intencionadas o no intencionadas) y poder descartar esas señales asegurando que la información que se va a procesar es veraz y fiable.
- **Disponibilidad (Availability)**. La disponibilidad se refiere al porcentaje de tiempo que un sistema está disponible y puede ser empleado de forma fiable. Por ejemplo, una detección de que la integridad del sistema se ha perdido supondría una pérdida de disponibilidad dado que el sistema no se podría utilizar.
- **Continuidad (Continuity)**. La continuidad es el tiempo que el sistema se puede emplear con integridad sin interrupciones. Este parámetro es fundamental por ejemplo en maniobras de aterrizaje cuando una pérdida de la continuidad puede tener consecuencias letales.
- **Precisión (Accuracy)**. La precisión es la calidad del posicionamiento que se logra con un sistema. Las correcciones que se computan en los sistemas GBAS o SBAS suponen unas mejoras muy importantes en la precisión en el posicionamiento.

Como es de esperar los requerimientos en estos cuatro parámetros son muy estrictos. En la siguiente tabla (Figura 19) se muestran algunos valores concretos para diferentes tipos de operación (como en ruta, procesos de aproximación o aterrizaje etc.). Dependiendo de la aplicación se establecerán unos estándares de operación u otros que llevarán asociados unos valores concretos para los cuatro parámetros explicados.

Typical Operation	Horizontal Accuracy (95%)	Vertical Accuracy (95%)	Integrity	Time-To-Alert (TTA)	Continuity	Availability
En-route	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
En-route Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Initial approach, Intermediate approach, Non-precision approach (NPA), Departure	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-I)	16 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ per approach	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ in any 15 s	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-II)	16 m (52 ft)	8 m (26 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ per approach	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ in any 15 s	0.99 to 0.99999
Category I precision Approach	16 m (52 ft)	6.0 m to 4.0 m (20 ft to 13 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ per approach	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ in any 15 s	0.99 to 0.99999

Figura 19. Valores de los parámetros de integridad en función del modo de operación [10]

Existen otra serie de conceptos fundamentales en todo sistema de aumentación para la comprensión de la utilidad y de la importancia de estos sistemas. Algunos de los más importantes son los siguientes [13], [14]:

- **Integrity Risk (riesgo de integridad)**. Es la probabilidad de que el error en la posición sea mayor el 'Alert Limit (AL)' (límite de alerta) establecido y no se notifique al usuario dentro del intervalo de tiempo máximo establecido (Time To Alert – TTA).



- Integrity Event (evento de integridad). Ocurre cuando el error en la posición es mayor al 'Protection Level (PL)' (nivel de protección) y no se avisa al usuario en el TTA.
- Alert Limit. Tolerancia máxima en el error hasta que se debe notificar al usuario de que se ha sobrepasado dicho nivel. Existe un Alert Limit horizontal (HAL) y otro vertical (VAL) (Figura 20). Estos límites dependen del modo de operación (APV-I, APV-II, LPV-200 etc.).
- Protection Levels. Se tratan de unos niveles (horizontal y vertical) que deben envolver al error en la posición con un nivel de confianza acorde con los requerimientos de integridad que se establezcan según la aplicación. Es decir:
  - El nivel de protección horizontal (HPL) es el radio de un círculo con su centro en la posición real del receptor que define la región donde se puede asegurar que se encuentra el receptor.
  - El nivel de protección vertical (VPL) es la mitad de la longitud de un segmento en el eje vertical con su centro en la posición real del receptor que define la región donde se asegura que se encuentra el receptor.

Es decir, el HPL junto con el VPL forman un cilindro (Figura 20) donde se puede garantizar que se encuentra el receptor.

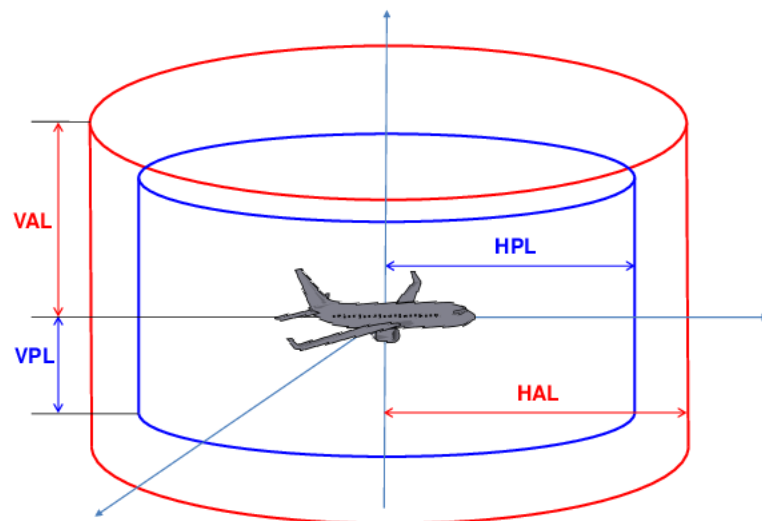


Figura 20. Cilindro SBAS [13]

- Time To Alert (TTA). Tiempo máximo permitido desde que el sistema se encuentra 'out of tolerance' hasta que se notifica al usuario.
- La condición 'out of tolerance' se da cuando el error horizontal (HPE – Horizontal Position Error) supera al HPL o el error vertical (VPE- Vertical Position Error) supera el VPL.

Existen pues diferentes posibles escenarios tal y como se ve en la Figura 21 (ejemplo para el caso horizontal):

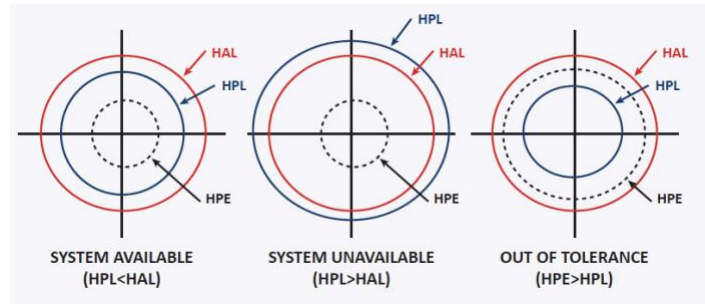


Figura 21. Casos posibles en función de HAL, HPL y HPE

1. Cuando los errores en el posicionamiento están dentro de los niveles de protección y los niveles de protección no superan a los límites de alerta el sistema está funcionando correctamente y por tanto está disponible.
2. Cuando los niveles de protección superan a los límites de alerta no se están cumpliendo los requisitos del sistema y por tanto el sistema no está disponible y se deberá notificar al usuario para que no lo utilice.
3. Cuando el error en el posicionamiento supera los niveles de protección nos encontramos en un caso de 'out of tolerance' o 'misleading information' en el que no se puede garantizar la integridad del sistema. Existen además dos subcasos:
  - a. Si el error supera los niveles de protección pero no los límites de alerta el sistema está en 'Misleading information' pero no se corre excesivo peligro dado que no se están superando los niveles de error máximos permitidos para la aplicación en cuestión.
  - b. Si el error supera los niveles de protección y también los límites de alerta entonces es un caso de 'Hazardous Misleading Information' y el riesgo en este caso es extremo. Si no se notifica rápido al usuario de la indisponibilidad del sistema las consecuencias pueden ser letales.

En la Figura 22 se muestran estos diferentes casos para el caso en el plano vertical.

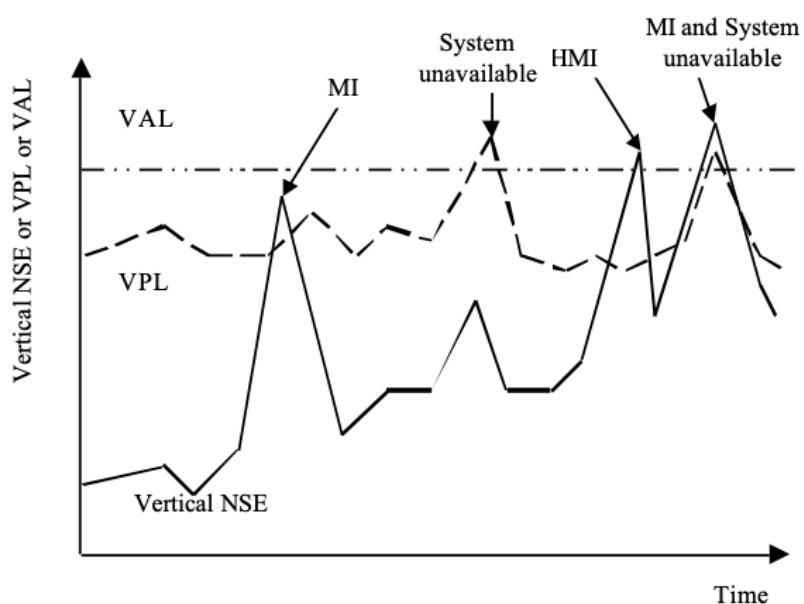


Figura 22. Casos posibles en función de VAL, VPL y VPE [12], [14]

#### 4.4. Stanford Diagram

Dada la importancia de estos conceptos su inclusión en la herramienta *GNSS Studio* ha sido indudable. Se ha incluido pues un apartado interactivo para trabajar con el Diagrama de Stanford [15] (Figura 23) que recoge en una única gráfica estos conceptos. En el eje horizontal se muestra el error en la posición (PE) ya sea horizontal o vertical. En el eje vertical se muestra el nivel de protección (PL). Así cuando se desarrolla un sistema de este tipo se toman medidas a lo largo del tiempo en las que se calcula el error en la posición (para un receptor del cual se conoce su posición real) y se computan los niveles de protección para cada instante. Se crea así un listado de pares de puntos entre error en la posición y nivel de protección calculado. Además se incluye en el diagrama los límites de alerta para establecer las diferentes zonas (tal y como se ve en la imagen) como se ha explicado anteriormente. Un punto por debajo de la diagonal supone un caso de ‘out of tolerance’.

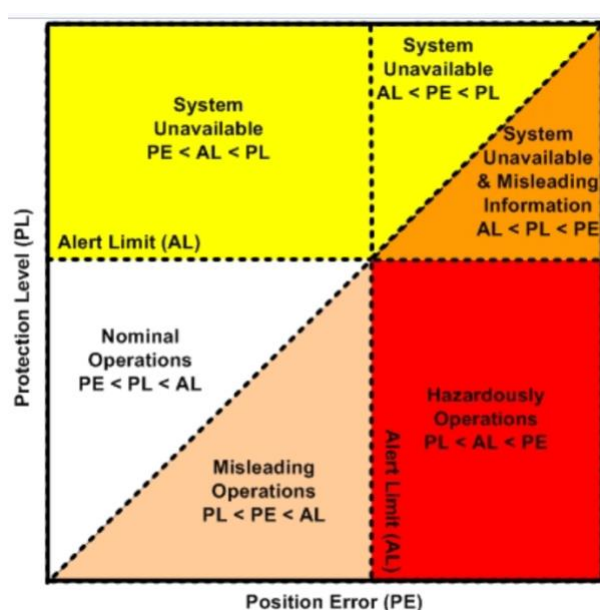


Figura 23. Diagrama de Stanford [13]

*GNSS Studio* incluye una herramienta con una base de datos de registros de pares VPL – VPE y HPL - HPE para el estudio de diferentes escenarios y de las causas que pueden producir la aparición de ciertas anomalías. En la sección de ejercicios (6.4.2) y en el anexo IV.B. STANDFORD DIAGRAM se muestran las imágenes que se obtienen con esta herramienta.

The screenshot shows the "Stanford Diagram Database" interface. It features a blue header with an information icon and a "Data" dropdown menu set to "1". Below this are input fields for "Vertical Alert Limit" and "Horizontal Alert Limit", both set to the value "40". At the bottom, there is a blue button labeled "Plot Stanford".

Figura 24. Herramienta Stanford Diagram en GNSS Studio

#### 4.5. SBAS Cylinder simulator

Se ha incluido también en *GNSS Studio* un simulador del cilindro de protección como se ha mostrado en la Figura 20. Este simulador permite seleccionar el error tanto horizontal como vertical que están experimentando el usuario, los niveles de protección (que se calculan a partir del mensaje SBAS) y los límites de alerta (que dependen del modo de operación). Tras la selección de estos parámetros se dibuja la posición del usuario como un punto azul y dos cilindros, el del nivel de protección y el de los límites de alerta. Para cada caso se muestra en el título de la imagen generada en que situación del diagrama de Standford nos encontramos para poder entender en detalle las casuísticas anteriormente explicadas. En la Figura 25 se muestran valores típicos de los niveles de alerta en función de la aplicación o modo de operación. La Figura 26 muestra la ventana de esta herramienta. En la sección de ejercicios (6.4.1) y en el anexo IV.A. CILINDRO SBAS se muestran las imágenes que se obtienen.

Typical operation	Horizontal Alert Limit	Vertical Alert Limit	TTA
En-route	7.4 km	N/A	5 min
En-route (continental)	3.7 km	N/A	15 s
En-route, Terminal	1.85 km	N/A	10 s
NPA	556 m	N/A	10 s
APV-I	40 m	50 m	6 s
APV-II	40 m	20 m	6 s
Category-I precision approach	40 m	15 m–10 m	6 s
Category-II precision approach	17.3 m	5.3 m	1 s
Category-III precision approach	15.5 m	5.3 m	1 s

Figura 25. Niveles de alerta para diferentes modos de operación [16]

Figura 26. Herramienta cilindro SBAS en GNSS Studio

Un ejemplo de las imágenes que se obtienen con esta herramienta de GNSS Studio se puede ver en la Figura 27.

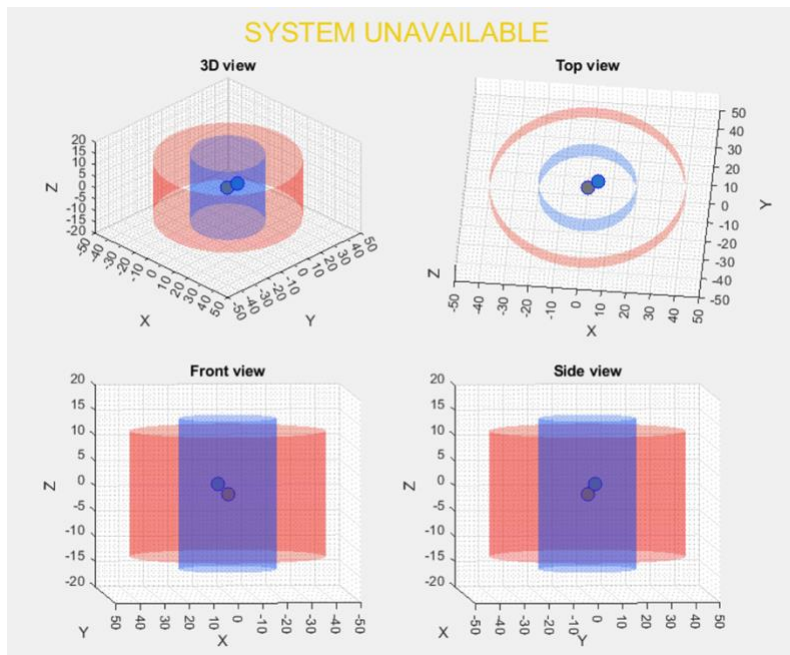


Figura 27. Ejemplo imagen obtenida con herramienta de cilindro SBAS de GNSS Studio

#### 4.6. Información mensajes SBAS

El último aspecto que es fundamental de los sistemas SBAS es entender que información aportan al usuario en cuanto a precisión, integridad etc. que suponen una mejora frente a las constelaciones GNSS típicas. Para ello se han incluido en *GNSS Studio* dos herramientas de software libre de la Agencia Espacial Europea que permiten el estudio de los mensajes que envía el SBAS: *SBAS Teacher* [3] y *SBAS Mentor* [2].

Se incluye a continuación un resumen de cual es la información que se transmite en estos mensajes [17]. Como se ha indicado anteriormente las correcciones que generan los sistemas SBAS son relativas a dos aspectos: por un lado errores en las órbitas y relojes de los satélites y por otro errores causados por el efecto de la ionosfera.

La extensa red de estaciones de los sistemas SBAS permiten tener un control en todo momento de los satélites GNSS, lo que permite detectar desviaciones en las órbitas de los satélites así como en sus relojes. De este modo se generan dos tipos de correcciones, 'fast' y 'long-term'. Las correcciones 'fast' tienen un periodo de actualización menor y se envían al usuario con mayor frecuencia. Las correcciones long-term aluden a desviaciones más a largo plazo. Además de generar estas correcciones los sistemas SBAS calculan el User Differential Range Error (UDRE) para cada satélite GNSS que se refiere a como los errores en las órbitas y relojes de los satélites provocan que el error en el posicionamiento aumente, concretamente en las medidas de rango (distancia del usuario al satélite). El UDRE es un valor en metros que se emplea posteriormente para calcular los niveles de protección. En el mensaje SBAS se envía el UDRE<sub>i</sub> que es un indicador de 0 a 15 que se corresponde con el nivel de UDRE. El valor 14 indica que ese satélite no está monitorizado y el valor 15 que ese satélite no debe usarse (cuando se detecta algún problema con el mismo).

Uno de los efectos más degradantes en los sistemas GNSS es el retraso que introduce la ionosfera en las señales que envían los satélites. Una densa red de estaciones monitoras en el área donde el SBAS va a dar servicio permite tener un control en tiempo real de la ionosfera. Existe una malla virtual (Figura 28) que divide la superficie de la tierra en diferentes puntos. Así, se declaran una serie de puntos llamados IGP (Ionospheric Grid Points) para los cuales el sistema SBAS calcula el retraso que introduce la ionosfera en ese punto en tiempo real. Un usuario puede calcular el retraso para su posición concreta interpolando con los cuatro IGP más cercanos. A parte de enviar esa información de retraso por IGP (GIVD - Grid Ionospheric Vertical Delay) se calcula cual es el error que introduce la ionosfera en cada IGP de cara al usuario (GIVE – Grid Ionospheric Vertical Error). El GIVE se emplea también en el cálculo de los niveles de protección. Existe también un GIVEi con valores de 0 a 15 igual que para el UDRE.

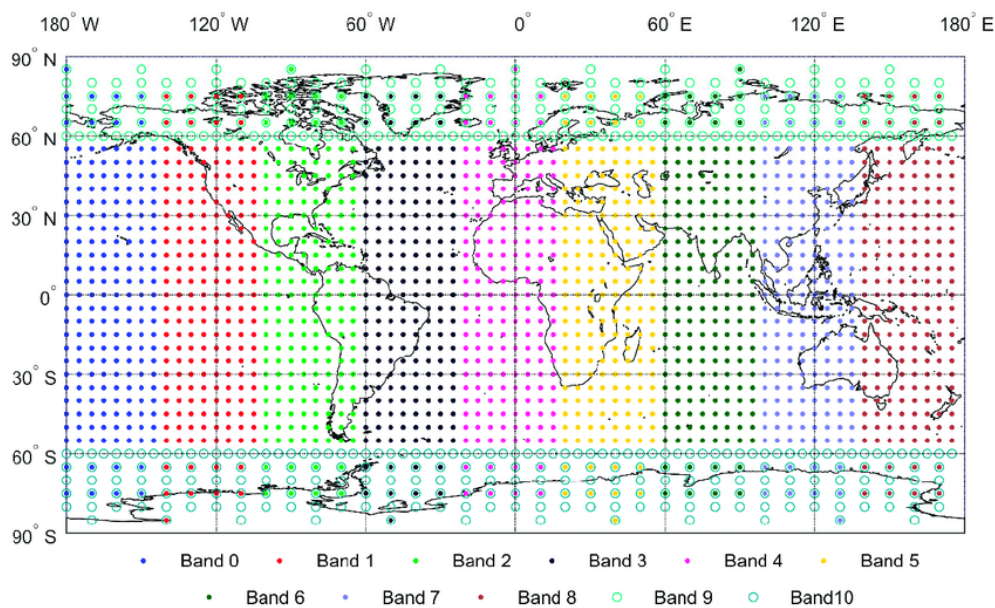


Figura 28. Red de IGP (Ionospheric Grid Points) y bandas

Existe otro tipo de información que también se incluye en los mensajes SBAS como por ejemplo:

- Secuencias PRN de ranging para utilizar también los satélites SBAS como satélites GNSS para la resolución de la ecuación de posicionamiento.
- Almanaque de otros satélites geoestacionarios de sistemas SBAS
- Matriz de covarianza. Permite hacer un mapeo del valor de UDRE concreto en función de la posición del usuario. Esto es así dado que el UDRE será más alto (peor) en las zonas en el límite del área de servicio y mas bajo (mejor) en el centro del área de servicio.
- SBAS Network Time, que es el sistema horario de referencia de cada sistema SBAS y parámetros de offset frente a UTC u otros sistemas temporales de referencia como el de GPS (GPS Time).

Las herramientas *SBAS Teacher* y *SBAS Mentor* permiten el estudio de la información que se transmite en los mensajes SBAS. Se ha incluido además en *GNSS Studio* una sección para la visualización fácil de la información que va en cada tipo de mensaje (Figura 29) y desde donde



The diagram illustrates the SBAS MESSAGE STRUCTURE, organized into three columns, each representing a different function. Each column is headed by an information icon (i) and a specific function label. Below these labels, various Message Types (MT) are listed in colored boxes.

Launch SISNeT UAS	Launch SBAS Teacher	Launch SBAS Mentor
MT 1	MT 6	MT 9
MT 2-5	MT 7	MT 17
MT 24	MT 28	MT 26
MT 25	MT 18	
MT 0	MT 27	MT 62
MT 10		MT 63
MT 12		

**Message Type 1**

i El mensaje de tipo 1 contiene la máscara de PRNs. Consiste en un bit por PRN indicando si dicho PRN esta activo (1) o si no lo está (0). Aunque por el tamaño del mensaje SBAS podría haber hasta 210 bits a 1, el máximo real es 51 PRNs activos al mismo tiempo debido a limitaciones de otros mensajes como el de tipo 6.

Ejemplo de mensaje codificado de tipo 1:  
 5307FF7FFFFC00000000000000000000008004000000  
 0000000000000884AE500

OK

#### 4.7. SBAS Teacher

Los mensajes se pueden descargar accediendo a la red SISNET [18] de la ESA donde se encuentran los mensajes SBAS de EGNOS tanto en tiempo real como un histórico de los

mismos. Copiando estas tramas en el *SBAS Teacher* se puede estudiar la información que hay en cada uno de las tramas: que tipo de mensajes se están transmitiendo, a que satélites GNSS se refiere la información de los mensajes etc. Dado que el acceso a los servidores de SISNET no es inmediato sino que es necesario solicitar una cuenta de usuario a la ESA, se han descargado ya una base de datos de mensajes para que el estudiante pueda pasar al estudio de los mismos directamente. Estos mensajes se han obtenido empleando la herramienta *SISNET UAS* (User Application Software) que permite el acceso a la red SISNET de la ESA para la recepción y descarga en tiempo real de los mensajes que transmite EGNOS.

Con *SBAS Teacher* se pueden decodificar los mensajes SBAS y ver sus contenidos (en función del tipo de mensaje) de una forma interactiva, pudiendo además modificar los contenidos del mismo a través de la interfaz gráfica.

En la herramienta *GNSS Studio* se permite el acceso inmediato a *SBAS Teacher* así como unas ayudas para facilitar su uso. En la sección de ejercicios prácticos (6.4.3) se incluyen diferentes propuestas para entender la información de los mensajes SBAS.

#### 4.8. *SBAS Mentor*

La herramienta SBAS MESSage GENERaTOR (*SBAS Mentor*) [2] fue desarrollada también por Iguassu Software Systems para la Agencia Espacial Europea. Se trata de una evolución de *SBAS Teacher* y permite la decodificación, edición y generación de mensajes SBAS a lo largo de un periodo de tiempo. Esto es interesante dado que a diferencia de *SBAS Teacher* se puede ver de una manera fácil como evoluciona la información de los mensajes SBAS a lo largo del tiempo sin tener que decodificar mensaje por mensaje.



## 5. TOOLS

La sección de Tools de *GNSS Studio* tiene como objetivo proporcionar una serie de herramientas que pueden ser muy útiles durante el estudio de sistemas GNSS. Esta pestaña contiene los siguientes elementos:

- Conversor CRX a RNX y viceversa. Dado que la mayoría de ficheros RINEX que se pueden descargar de internet vienen en el formato comprimido CRX este conversor permite descomprimir ese formato y también comprimir ficheros en formato RNX a CRX.
- Transformación temporal GPS Time – UTC. En todos los sistemas GNSS se utiliza el tiempo GPS como referencia ya sea con el número de semana (Week Number) y el tiempo en la semana (Time Of Week – TOW) o con la época (epoch). Esta herramienta permite cambiar entre UTC y el tiempo GPS y viceversa teniendo en cuenta los ‘leap seconds’.
  - Un Leap Second [19] (segundo intercalar o adicional) es un ajuste de un segundo para mantener los estándares de emisión de tiempo cercanos al tiempo solar medio. Estos segundos son necesarios para mantener los estándares sincronizados con los calendarios civiles, cuya base es astronómica. Dado que estos segundos se han ido añadiendo a UTC es necesario tenerlos en cuenta en la conversión UTC – GPS Time.
- Conversor de parámetros orbitales a Latitud-Longitud-Altura (LLA). Permite obtener las coordenadas en LLA a partir de los seis parámetros orbitales que caracterizan una órbita de GNSS y la fecha y hora para saber la posición del satélite en la órbita.
- Conversor de coordenadas. Otra utilidad interesante es un conversor entre sistemas de referencia de coordenadas. Con esta herramienta se puede realizar la conversión entre diferentes sistemas de coordenadas, concretamente: ECEF, LLA y NEU.
  - ECEF es un sistema referencial que es fijo con respecto a la tierra, su origen es el centro de la tierra y por lo tanto gira con su rotación. Es ampliamente utilizado en numerosas aplicaciones dentro de los sistemas de navegación por satélite.
  - LLA es una forma más sencilla y entendible de establecer la posición con respecto a la tierra, por eso es el sistema usado de cara a los usuarios. Para obtener las coordenadas en LLA a partir de ECEF es necesario indicar el datum de referencia, normalmente el WGS94.
  - NEU es un sistema similar a LLA pero su origen se puede ubicar en cualquier punto con respecto al cual se quieren dar las coordenadas.

En la Figura 31 se muestra como es la ventana de ‘Tools’ con las cuatro herramientas que se han explicado. En ANEXO II. CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA ‘TOOLS’ DE GNSS STUDIO se puede ver en detalle y paso por paso como es el uso de la pestaña ‘Tools’.

GNSS STUDIO

Universidad  
Zaragoza

RINEX

TOOLS

GLAB

SBAS

Compressed RINEX

Browse File

File

Path

To CRX

To RNX

Time Converter

Month/Day/Year08-Jun-2021

Hour:Minute:Second01:20:56

To GPS

To UTC

GPS Epoch1307150474

Week Number2161

Time Of Week177674

Ephemeris to LLA

Month/Day/Yearmm/dd/yyyy

Hour:Minute:Second00:00:00

a4.217e+0o0.03924

e0.000151w0.03924

i0.03924M0.03924

Get LLA

Coordinate Converter

East-784839.787X3914185.582Lon45

To ENU

To LLA

North2696387.360Y-2259856.095Lat-30

To ECEF

To ECEF

Up5711730.039Z4489469.729Height3000

Coordinate Origin20,-20,0

Figura 31. Pestaña 'Tools' de GNSS Studio

## 6. LISTADO EJERCICIOS

Dado el carácter didáctico de este trabajo en esta sección se recogen una serie de propuestas de ejercicios a realizar con *GNSS Studio* con el objetivo de facilitar el uso de esta herramienta en un ámbito académico como pueden ser las prácticas de una asignatura. Se proponen ejercicios para cubrir todos los campos de la navegación por satélite que se han incluido en la herramienta por considerarse fundamentales. En los anexos se puede ver el proceso detallado de la obtención de las diferentes gráficas así como algunas de las gráficas que se obtienen.

### 6.1. Ejercicios ficheros RINEX

Previo a la realización de estos ejercicios se recomienda la familiarización con el formato de los ficheros leyendo las ayudas que incluye *GNSS Studio* y revisando los enlaces de estas ayudas.

#### 6.1.1. Descarga de ficheros RINEX

Descarga de ficheros RINEX tanto de observación, como navegación, como SP3 de alguna de las fuentes proporcionadas o de alguna otra que se conozca. Es importante asegurarse que la versión de RINEX empleada es la 3.02, esto será lo que ocurra en la mayoría de los casos pero si se descargan ficheros de fechas muy antiguas podrían estar empleando otras versiones diferentes. Recordar que si los ficheros se descargan en formato comprimido CRX pueden descomprimirse en la pestaña de 'Tools'. Si hubiese algún problema con la descarga de ficheros existen algunos ficheros ya descargados en la carpeta 'files'.

#### 6.1.2. Visualización de las medidas de observaciones

Cargar y leer un fichero de observaciones. Dibujar para el caso de diferentes satélites de diferentes constelaciones los diferentes tipos de medidas: pseudoranges (medidas de código), medidas de fase, SNR y Doppler. Dar explicaciones de la evolución de cada tipo de medidas o de posibles anomalías que puedan aparecer en las mismas. En la Figura 32 se muestran algunos ejemplos similares a los mostrados en la sección 2.3 o en el ANEXO I: CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA 'RINEX' DE GNSS STUDIO.

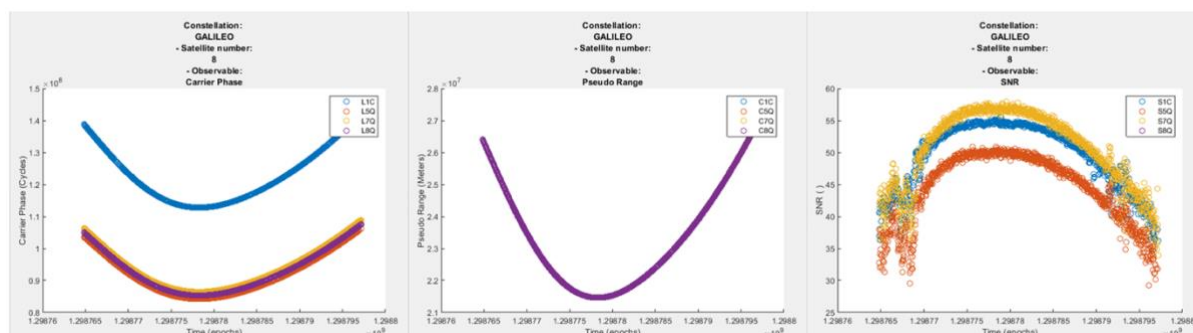


Figura 32. Ejemplo visualización medidas de fase, código y SNR para satélite de Galileo

### 6.1.3. Visualización de las medidas de los ficheros de navegación

Cargar y leer un fichero de navegación. Seleccionar diferentes satélites y dibujar tanto la órbita como la traza. Revisar cual es el proceso teórico para obtener la órbita de un satélite y su posición en la misma con la información de las efemérides que se obtienen de la navegación. Puede ser interesante también dibujar las órbitas de todos los satélites de GPS para observar los diferentes ángulos de inclinación de las órbitas y verificar que son los correctos. Explicar la forma que tiene la traza de los satélites en la representación 2D.

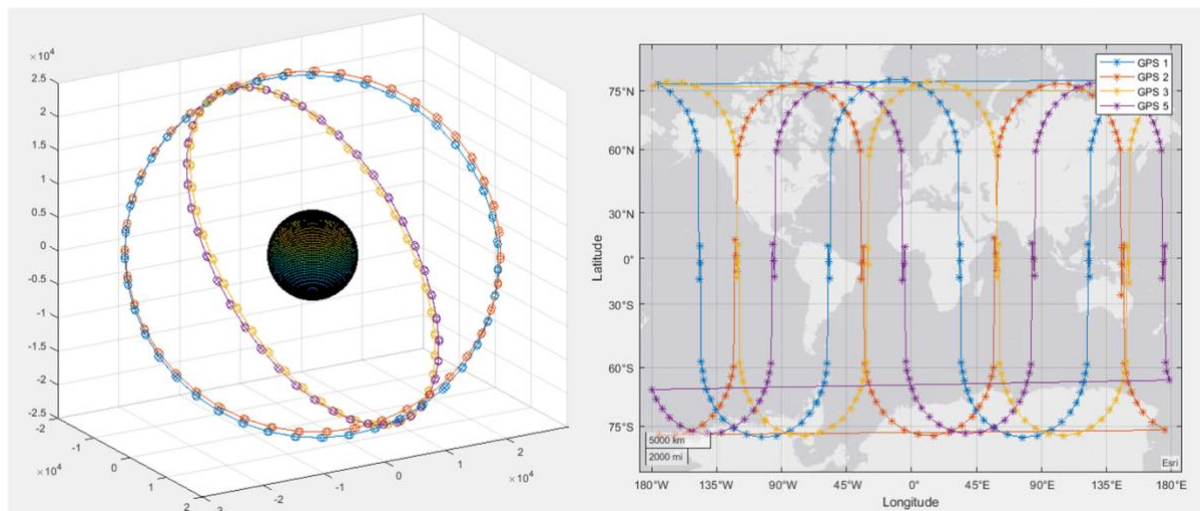


Figura 33. Ejemplo órbitas y trazas de cuatro satélites GPS a partir de fichero de navegación, día 01/01/2020

### 6.1.4. Visualización de las medidas de los ficheros SP3

Cargar y leer un fichero SP3. Realizar el mismo proceso que con los ficheros de navegación. Sabemos que la información de los ficheros SP3 son las coordenadas ECEF del satélite para posición y opcionalmente su velocidad. Tras la transformación de efemérides de navegación a ECI deberíamos obtener la misma órbita que con el paso de la información ECEF de los SP3 a ECI. Por ello se sugiere obtener dos ficheros uno de navegación y otro SP3 para el mismo día. Al representar las órbitas y trazas para ambos ficheros deberíamos obtener el mismo resultado exactamente. Esto lo podemos ver en la Figura 33 y Figura 34. Esas dos figuras han sido generadas con los ficheros CORD00ARG\_R\_20200010000\_01D\_GN.rnx y cod20863.eph que se corresponden con ficheros RINEX de navegación y RINEX SP3 respectivamente para el mismo día (01/01/2020). Se puede ver que las órbitas y trazas obtenidas coinciden.

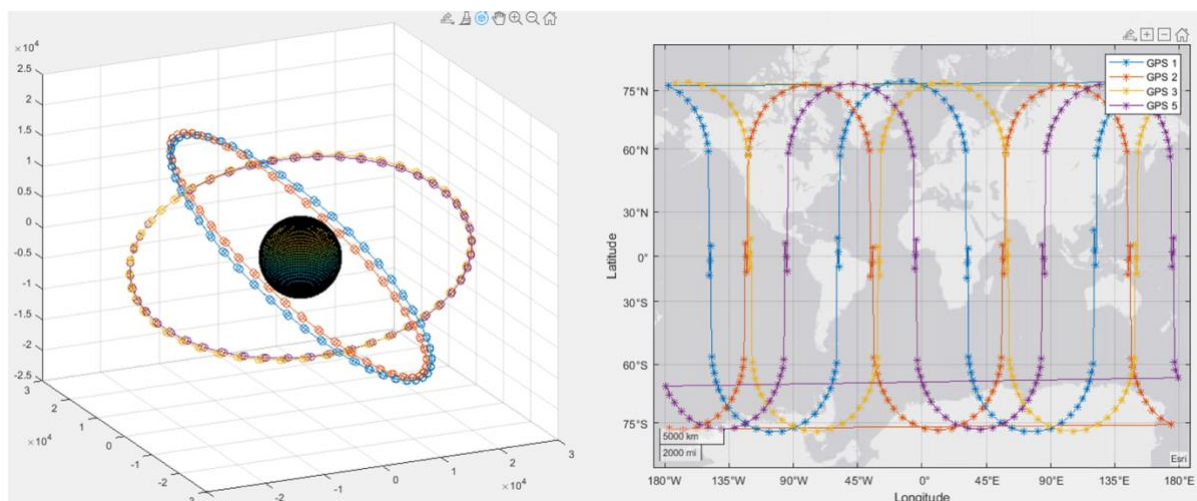


Figura 34. Ejemplo órbitas y trazas de cuatro satélites GPS a partir de fichero SP3, día 01/01/2020

#### 6.1.5. Generación de ficheros RINEX con app móvil

Con la ayuda de la aplicación móvil ‘RINEX Logger’ grabar y crear ficheros RINEX propios. Es importante que el dispositivo móvil se encuentre en un espacio abierto y que las grabación de medidas sea lo más larga posible para que luego al analizar las observaciones con *GNSS Studio* se pueda ver fácilmente la evolución de las medidas (si el tiempo de observación es muy corto apenas se podrá apreciar la evolución).

### 6.2. Ejercicios Tools

Estos ejercicios pretenden la familiarización con los diferentes sistemas de coordenadas y sistemas de referencia temporal. Aunque la pestaña de ‘Tools’ está pensada simplemente para ayudar a realizar cambios de coordenadas o de sistemas temporales cuando se necesite, también se puede emplear para comprobar los resultados que se obtienen al hacer estas operaciones a mano. Se propone así pues realizar diferentes cambios de coordenadas entre ECEF, ECI, LLA y NEU pudiendo validar los resultados con *GNSS Studio*. La realización de estos ejercicios a mano resulta interesante para internalizar las diferencias entre los sistemas de coordenadas. Para el caso de cambio de efemérides a LLA se recomienda también la realización del ejercicio a mano y la validación con *GNSS Studio*. La realización de los cálculos para la obtención de la posición en coordenadas ECEF o LLA a partir de las efemérides ayuda a comprender el significado de cada uno de los parámetros orbitales.

### 6.3. Ejercicios con gLAB

Dada la madurez de *gLAB* la cantidad de posibilidades que ofrece esta herramienta es muy grande, por ello en este apartado se detallan los primeros ejercicios que habrían de realizarse con *gLAB* pudiendo más adelante realizar ejercicios más complejos modificando parámetros más avanzados. Para estos ejercicios se pueden emplear los ficheros RINEX de la carpeta ‘gLAB’ dentro de la carpeta ‘files’. Las imágenes correspondientes a los ejercicios de este subapartado pueden verse en el anexo III.B. IMÁGENES GLAB DE LA SECCIÓN DE EJERCICIOS. Para más ejercicios prácticos con *gLAB* consultar [6] y [7].

### 6.3.1. Posicionamiento Estándar (Standard Point Positioning - SPP)

El objetivo de este ejercicio es ver como un receptor con la información de los ficheros RINEX calcula su posición y estudiar los errores de la misma. Los ficheros de navegación contienen las órbitas y relojes de los satélites que permiten establecer su posición en cada momento. Los ficheros de observaciones contienen las medidas (en este caso se emplean las de código) con las que se puede calcular la distancia a los satélites. Con la posición de los satélites y la distancia a los mismos se puede establecer la posición del receptor. En la ventana de Input cargar ficheros RINEX de observación y navegación para el mismo día y receptor (por ejemplo *madr3060.09o* y *brdc3060.09n*). Seleccionar las opciones de SPP y ejecutar *gLAB*. Ir a la ventana de análisis y sacar la gráficas de error tanto NEU como horizontal que muestran cual es la evolución del error a lo largo del tiempo (esto se obtienen comparando la posición real del receptor con la que se obtiene con los cálculos).

- Por defecto el procesado que hace *gLAB* es con el modo Kinematic activado. Si el fichero RINEX de observaciones se corresponde a un receptor estático conviene cambiar al modo estático dado que los resultados serán mucho mejores gracias al uso de un filtro que procesa las coordenadas del receptor como constantes.
- En la ventana de filtrado se pueden probar diferentes opciones para el procesado de los RINEX. Probar a usar a parte de las medidas de pseudorange las de fase y también las de pseudorange suavizado (con las de fase). Probar también el uso de varias frecuencias. Comentar los resultados que en cada caso en cuanto a la magnitud del error obtenido.

### 6.3.2. Posicionamiento preciso (Precise Point Positioning - PPP)

En este apartado se comprueban las notables mejoras del uso de posicionamiento preciso primeramente en modo estático. Para ello se debe seleccionar este modo en la ventana de Input. Esta selección permitirá añadir nuevos ficheros concretamente los ficheros ANTEX y los SP3. Los ficheros ANTEX contienen información sobre las antenas en cuanto a desviaciones y offsets y los SP3 contienen, como ya se ha explicado, las órbitas precisas de los satélites en formato ECEF. Se pueden emplear los ficheros *igs05\_1552.atx* y *igs15561.sp3* respectivamente. Con estos nuevos archivos podemos reejecutar *gLAB* y comprobar los resultados obtenidos en cuanto a error NEU y horizontal, se puede ver que el error se reduce muy considerablemente llegando a valores de casi 0 metros cuando los algoritmos han convergido. Si se cambia a modo Kinematico en la pestaña de 'Filter' se puede ver que los resultados no son tan buenos dado que la posición ya no se procesa como constantes y por tanto es más difícil la determinación de la posición.

### 6.3.3. Precisión en el posicionamiento según la localización en la tierra

Es interesante analizar como cambia la calidad en el posicionamiento en función de donde se encuentre el receptor dado que el número de satélites en vista, el ángulo de elevación y azimuth de los mismos será distinto y esto derivará en diferentes resultados en el posicionamiento. Para ello se dispone de ficheros de observaciones de tres receptores: uno cerca del polo norte (*alrt3060.09o*), otro en latitudes medias (*madr3060.09o*) y otro cerca del

Ecuador (kour3060.09o). Además es necesario el fichero de navegación correspondiente a ese día (brdc3060.09n). Si se prefiere se pueden obtener estos ficheros de internet siempre y cuando sean todos del mismo día, sino la comparación no tendría sentido. Una vez ejecutado *gLAB* en modo SPP se propone analizar los resultados para los tres receptores sacando gráficas de Skyplot, Dilution Of Precision (DOP) y las de errores ya estudiadas.

- Las gráficas de tipo Skyplot permiten ver como es el paso de los satélites con respecto al receptor (que está en el punto (0,0) en la gráfica). Se podrá ver que para el caso del receptor cerca del polo norte no pasa ningún satélite directamente por encima de él.
- Las gráficas de DOP muestran los diferentes tipos de DOP a lo largo del tiempo. Observamos claramente que cuanto mayor es la latitud del receptor las variaciones en el DOP son mucho más rápidas. El DOP depende de la geometría de los satélites que se están empleando. Lo que sucede cerca del polo norte es que los satélites están en vista y desaparecen constantemente y por tanto se cambia con mucha frecuencia los satélites que se están monitorizando resultando en una variación de la geometría de los satélites constante y por lo tanto en un DOP muy cambiante. Cerca del Ecuador encontramos el efecto contrario.

#### 6.3.4. Calidad del receptor

Uno de los factores que son determinantes en la calidad del posicionamiento es la calidad del receptor que se está empleando. Esto se refiere a todos los elementos de hardware que componen el receptor como la antena, filtros, amplificadores, mezcladores etc. así como la localización del mismo y los alrededores del mismo, en cuanto a otras señales interferentes, objetos que produzcan multipath etc. Para este ejercicio se dispone de dos ficheros de observaciones que se corresponden con dos receptores que midieron en ambiente los datos durante un día, uno de ellos es un receptor sencillo (gage1580.05o) y el otro es un receptor de alta precisión y muy buena calidad (upc41580.05o), será necesario también el fichero de navegación (brdc1580.05n).

### 6.4. Ejercicios SBAS

Al igual que con el resto de secciones lo primero que se sugiere hacer es leer detenidamente las ayudas de *GNSS Studio* para entender bien los diferentes conceptos, por una lado los que se refieren a integridad, continuidad, disponibilidad y precisión, y por otro los que se refieren a los eventos de integridad, niveles de protección, límites de alerta etc.

#### 6.4.1. Cilindro SBAS

Una vez se han comprendido las diferentes posibilidades de funcionamiento de un sistema SBAS en función del error, los niveles de protección proporcionados por el SBAS y los límites de alerta que exige el modo de operación, con la herramienta del cilindro se puede ver fácilmente cada uno de esos casos. De este modo generar los siguientes ejemplos:

- Funcionamiento nominal del sistema
- Misleading Information caso horizontal



- Misleading Information caso vertical
- System Unavailable caso horizontal
- System Unavailable caso vertical
- System Unavailable & Misleading Information caso horizontal
- System Unavailable & Misleading Information caso vertical
- Hazardous Misleading Information caso horizontal
- Hazardous Misleading Information caso vertical

Explicar que consecuencias tiene cada punto. Dibujar en un diagrama de Stanford a mano donde se encontraría cada uno de los puntos anteriores, esto sirve de enlace para el siguiente punto. En la Figura 35 se muestra uno de los casos, más ejemplos pueden verse en el anexo IV.A. CILINDRO SBAS.

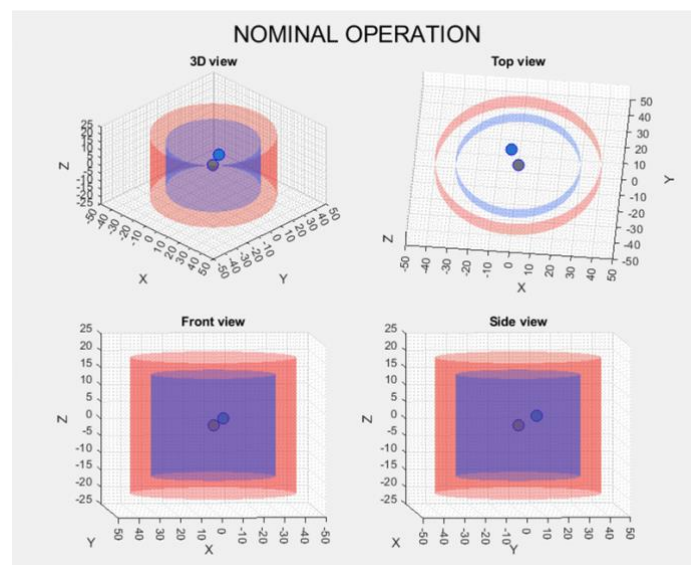


Figura 35. Ejemplo cilindro SBAS con GNSS Studio

#### 6.4.2. Diagrama de Stanford

El diagrama de Stanford es una de las mejores formas de entender los conceptos de integridad (cada punto a la derecha de la diagonal supone un evento de integridad), disponibilidad (cuando los niveles de protección superan los límites de alerta el sistema no está disponible), continuidad (cada evento de integridad o de no disponibilidad supone un parón en la continuidad) y precisión (en función de la magnitud del error).

Para esta sección el ejercicio propuesto es ir probando las diferentes muestras de la base de datos que se ha preparado y ver como es el diagrama de Stanford en cada caso dando explicaciones de las anomalías que aparecen en cada caso. En la Figura 36 se muestra el caso de una de las muestras, en el anexo IV.B. STANDFORD DIAGRAM se pueden ver ejemplos de otras muestras de la base de datos.

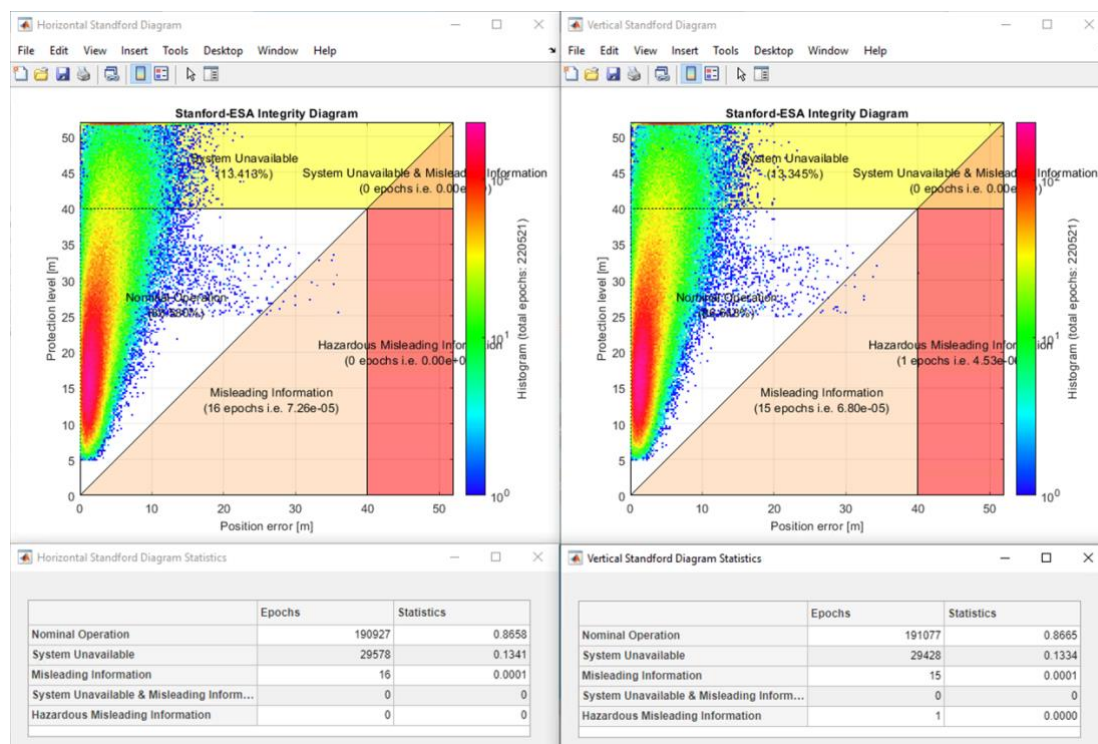


Figura 36. Ejemplo muestra base de datos del Diagrama de Stanford de GNSS Studio

### 6.4.3. Estructura de mensajes SBAS

Primeramente con los botones interactivos de *GNSS Studio* se puede analizar el contenido de cada tipo de mensaje o consultarlo en cualquier momento. En el anexo IV.C. ESTRUCTURA DE MENSAJES SBAS se muestran dichas ayudas. Dentro de la carpeta 'files' podemos encontrar diferentes logs de mensajes de EGNOS en 'SISNeT Logs'.

Con *SBAS Teacher* decodificar algunos de estos mensajes y analizar su contenido. Se sugiere decodificar un mensaje de cada tipo e indicar la información que hay en esos mensajes y a que satélites se corresponde.

Con *SBAS Mentor* se puede leer el archivo .ems completo y nos permite analizar el cambio de los mensajes a lo largo del tiempo. Algunos tipos de mensajes cambian con mas frecuencia como las 'slow corrections' de los mensajes 2 a 5 y otras que cambian con menos frecuencia, por este motivo no en todos los tipos de mensajes se verá una evolución temporal significativa.

## 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo el objetivo ha sido la creación de una herramienta de herramientas que permita a los estudiantes familiarizarse de una forma intuitiva, interactiva y visual con los sistemas de navegación por satélite. Para ello se analizó cuales son los conceptos más importantes dentro de los sistemas GNSS y se han creado las utilidades necesarias para la comprensión de esos conceptos. Además y con el objetivo de lograr que *GNSS Studio* sea lo más completa posible, se han integrado otras herramientas de uso académico y abierto, concretamente *gLAB*, *SBAS Mentor*, *SBAS Teacher* y *SISNeT UAS*.

*GNSS Studio* se ha desarrollado en Matlab dado que es una plataforma ya conocida por los estudiantes y que también puede facilitar en el futuro la ampliación de la herramienta. La usabilidad ha sido un objetivo fundamental por lo que se ha incluido ayudas en toda la herramienta para facilitar tanto su uso como la comprensión de conceptos teóricos.

Se puede concluir que sin duda se han conseguido alcanzar todos los objetivos que se plantearon en un inicio y se prevé que se pueda comenzar a usar la herramienta en el próximo curso. *GNSS Studio* supone un antes y un después en la enseñanza sobre navegación por satélite en la Universidad de Zaragoza y sus posibilidades de ampliación y evolución permitirán que conforme pasen los años la cantidad de conocimientos que van a poder adquirir los alumnos siga creciendo.

En cuanto al desarrollo de la herramienta en el futuro las posibilidades son muy variadas. Dada la complejidad de los sistemas de navegación por satélite la cantidad de utilidades que se pueden añadir a *GNSS Studio* es muy grande pudiendo hacer la herramienta cada vez más completa con utilidades más complejas o específicas de algunos campos concretos. A continuación se lista una serie de posibilidades de ampliación de la herramienta:

- Inclusión de utilidades dentro del procesamiento de señales GNSS. En esta primera versión *GNSS Studio* se centra en el funcionamiento genérico de los sistemas de navegación por satélite. Sin embargo, podrían añadirse nuevas herramientas para el estudio de la generación de las señales GNSS a nivel de procesamiento de señal y el estudio de las modulaciones empleadas en este tipo de sistemas.
- Análisis de ficheros ANTEX, RINEX de ionosfera o relojes. A pesar de no ser los ficheros RINEX más importantes estos ficheros con información sobre las antenas y relojes de los satélites o con información ionosférica también pueden ser interesantes.
- Actualización de los scripts de procesamiento de los ficheros RINEX para que se adapten a las nuevas versiones de RINEX que se desarrollen en el futuro.
- Ampliación de los scripts de procesamiento de RINEX de observaciones para la detección de anomalías en los archivos como saltos de ciclo, data gaps etc.
- En cuanto a las herramientas integradas la cantidad de ejercicios y análisis que se puede realizar es muy grande especialmente con el caso de *gLAB* dado que se trata de una herramienta muy madura y evolucionada durante más de 10 años.
- Inclusión de otras herramientas externas que se puedan encontrar interesantes o que se desarrollen en el futuro.
- En la sección de 'Tools', inclusión de utilidades de conversión entre UTC y otros sistemas de referencia temporales como TAI.

- Inclusión de una utilidad de análisis de prestaciones de los sistemas SBAS actualmente en funcionamiento como EGNOS, WAAS, GAGAN o MSAS.

## CRONOGRAMA

ACTIVIDAD	SEMANA	13/1/21	20/1/21	27/1/21	3/2/21	10/2/21	17/2/21	24/2/21	3/3/21	10/3/21	17/3/21	24/3/21	31/3/21	7/4/21	14/4/21	21/4/21	28/4/21	5/5/21	12/5/21	19/5/21	26/5/21	2/6/21	9/6/21	16/6/21	23/6/21
Establecer alcance y objetivos																									
Documentación y estudio en GNSS y SBAS																									
Estado del arte en herramientas de navegación por satélite																									
Selección de plataforma de desarrollo																									
Aprendizaje uso de Matlab App Designer																									
Desarrollo scripts de procesado de ficheros RINEX																									
Desarrollo de herramientas pestaña 'Tools'																									
Preparación de ayudas interactivas																									
Desarrollo scripts de herramientas SBAS																									
Integración de herramientas externas																									
Redacción de la memoria																									

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. S. A. (. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), «gLAB Webpage,» [En línea]. Available: <https://gage.upc.edu/gLAB/>.
- [2] E. S. A. Iguassu Software Systems, «[www.egnos-pro.esa.int/sbasmentor](http://www.egnos-pro.esa.int/sbasmentor/),» [En línea]. Available: <http://www.egnos-pro.esa.int/sbasmentor/index.html>.
- [3] E. S. A. Iguassu Software Systems, «[www.egnos-pro.esa.int/sbasteacher](http://www.egnos-pro.esa.int/sbasteacher/),» [En línea]. Available: <http://www.egnos-pro.esa.int/sbasteacher/index.html>.
- [4] U. P. d. Cataluña, «GNSS Format Descriptions,» [En línea]. Available: <https://gage.upc.edu/gFD/>.
- [5] «NAVIPEDIA,» [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Main\\_Page](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Main_Page).
- [6] J. J. Z. a. M. H.-P. J. Sanz Subirana, GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms, ESA Communications, May 2013.
- [7] J. J. Z. a. M. H.-P. J. Sanz Subirana, GNSS DATA PROCESSING Volume II: Laboratory Exercises, ESA Communications, May 2013.
- [8] «SBAS - NAVIPEDIA,» [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_General\\_Introduction](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_General_Introduction).
- [9] «GBAS - NAVIPEDIA,» [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ground-Based\\_Augmentation\\_System\\_\(GBAS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ground-Based_Augmentation_System_(GBAS)).
- [10] «SBAS Fundamentals - NAVIPEDIA,» [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_Fundamentals](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Fundamentals).
- [11] The European Geostationary Navigation Overlay System – A Cornerstone of Galileo, European Space Agency Publications , December 2006.
- [12] «The SBAS Integrity Concept Standardised by ICAO: Application to EGNOS,» [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The\\_SBAS\\_Integrity\\_Concept\\_Standardised\\_by\\_ICAO:\\_Application\\_to\\_EGNOS](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The_SBAS_Integrity_Concept_Standardised_by_ICAO:_Application_to_EGNOS).
- [13] «Integrity - NAVIPEDIA,» [En línea]. Available: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Integrity>.
- [14] E. C. J. V.-T. (. Benoit Roturier(DGAC/STNA), «The SBAS Integrity Concept Standardised by ICAO. Application to EGNOS».
- [15] «Standford Diagram - NAVIPEDIA,» [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The\\_Stanford\\_-\\_ESA\\_Integrity\\_Diagram:\\_Focusing\\_on\\_SBAS\\_Integrity](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The_Stanford_-_ESA_Integrity_Diagram:_Focusing_on_SBAS_Integrity).

- [16] T. R. I. o. Navigation, «A New Avionics-Based GNSS Integrity Augmentation System: Part 2 – Integrity Flags,» *The Journal of Navigation*, vol. 66, nº 4, May 2013.
- [17] [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The\\_EGNOS\\_SBAS\\_Message\\_Format\\_Explained](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The_EGNOS_SBAS_Message_Format_Explained).
- [18] «SISNET,» [En línea]. Available: <http://www.egnos-pro.esa.int/sisnet/index.html>.
- [19] «Leap Seconds - Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Leap\\_second](https://en.wikipedia.org/wiki/Leap_second).
- [20] «SBAS Systems - NAVIPEDIA,» [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_Systems](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Systems).



## ACRÓNIMOS

ABAS	Aircraft Based Augmentation System
AL	Alert Limit
CRX	Compressed RINEX
DGPS	Differential GPS
DOP	Dilution Of Precision
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
ECI	Earth Centered Inertial
EGNOS	European Geostacionary Navigation Overlay System
GBAS	Ground Based Augmentation System
GIVD	Grid Ionospheric Vertical Delay
GIVE	Grid Ionospheric Vertical Delay
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HAL	Horizontal Alert Limit
HMI	Hazardous Misleading Information
HPE	Horizontal Position Error
HPL	Horizontal Protection Level
IGP	Ionospheric Grid Point
IPP	Ionospheric Pierce Point
LLA	Longitude Latitude Altitude
MI	Misleading Information
NEU	North East Up
PE	Position Error
PL	Protection Level
PPP	Precise Point Positioning
PRN	PseudoRandom Noise
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SoL	Safety of Life
SPP	Standard Point Positioning
TTA	Time To Alert
UDRE	User Differential Range Error
UDREi	UDRE Indicator
UTC	Coordinated Universal Time
VAL	Vertical Alert Limit
VPE	Vertical Position Error
VPL	Vertical Protection Level

## ANEXO I: CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA ‘RINEX’ DE GNSS STUDIO

En este anexo se detalla cual es el proceso para obtener las diferentes figuras en cuanto al procesamiento de ficheros RINEX. El anexo está dividido en tres subsecciones para los tres tipos de RINEX que se pueden procesar en la primera versión de *GNSS Studio*.

### I.A. RINEX DE OBSERVACIONES

La ventana para procesar RINEX de observaciones es la mostrada en la Figura 37.

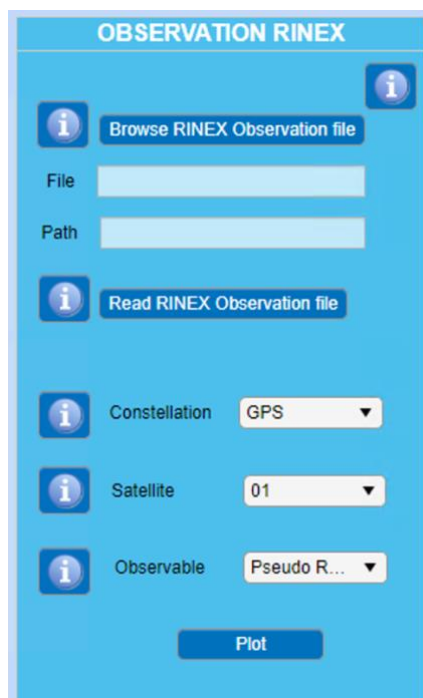


Figura 37. Ventana procesado RINEX de observación

Las ayudas que se obtienen haciendo clic en los diferentes botones para entender como procesar este tipo de ficheros son las mostradas en la Figura 38.

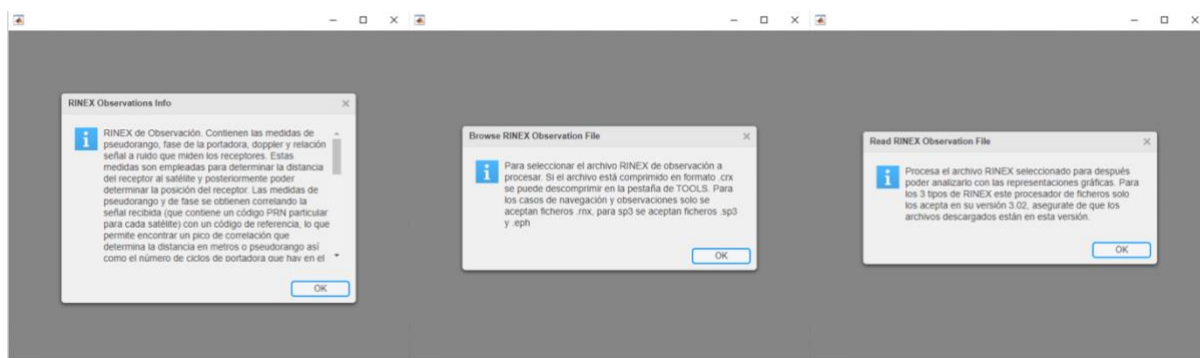


Figura 38. Ayudas para entender como cargar y procesar ficheros RINEX de observación

Cuando hacemos clic en ‘browse’ podemos seleccionar el archivo que deseemos con extensión .rnx.

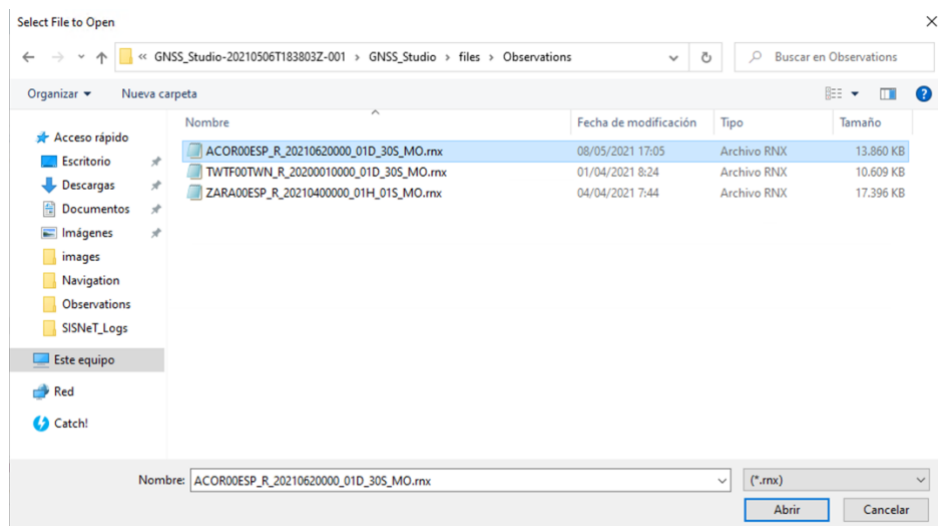


Figura 39. Selección del archivo RINEX de observación a procesar.

Los campos de 'file' y 'path' aparecerán rellenos.

Figura 40. Ventana RINEX de observación tras seleccionar un fichero

Después haciendo clic en 'Read' se procesa el fichero.

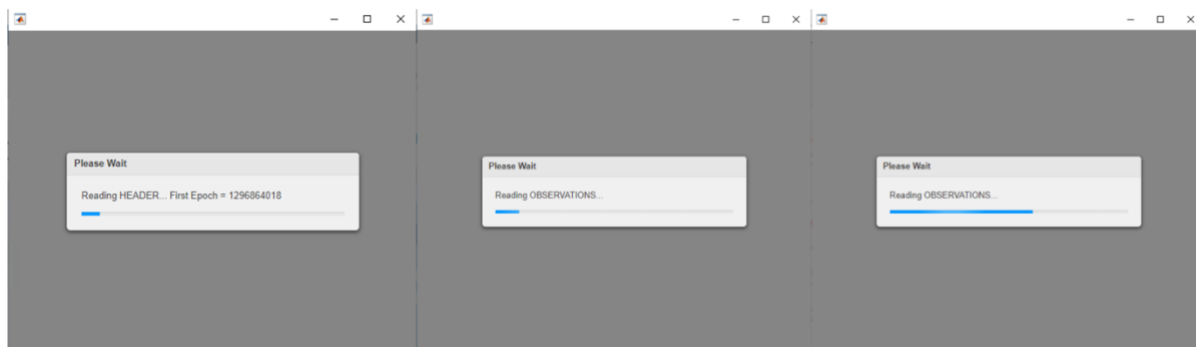


Figura 41. Lectura y procesado el fichero RINEX de observación

Cuando el fichero se ha terminado de procesar se muestra una ventana de confirmación y un mapa con la posición del receptor correspondiente a las observaciones del fichero RINEX.

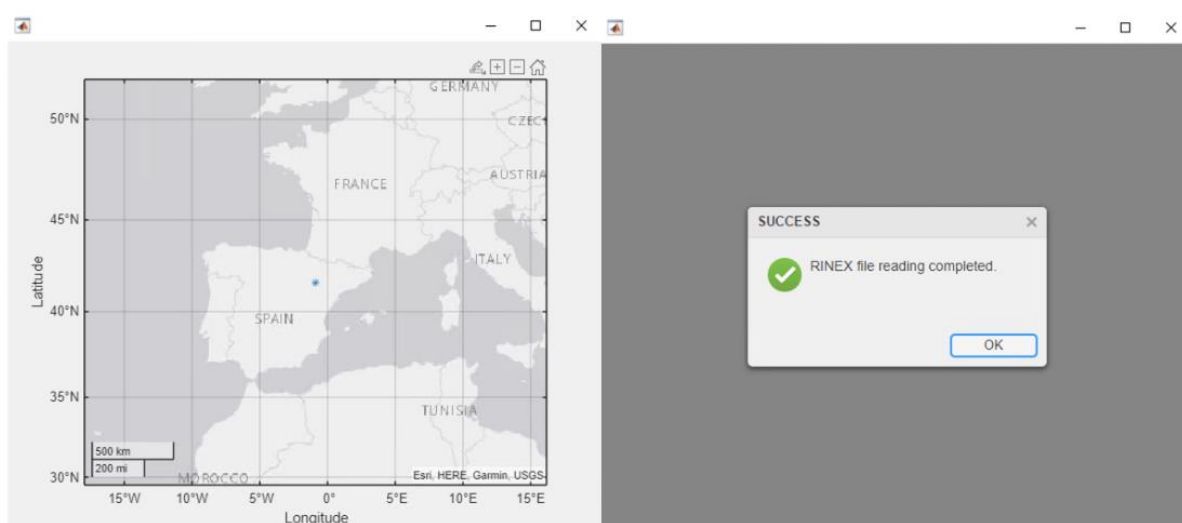


Figura 42. Fichero de observación RINEX procesado correctamente

Con el fichero procesado se puede pasar a la generación de imágenes con la selección de la constelación, el satélite y el tipo de medida a visualizar. Se muestran a continuación algunos ejemplos.

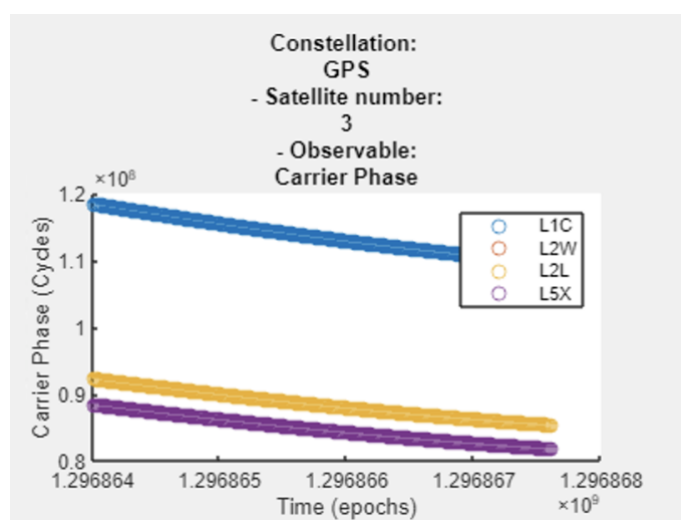


Figura 43. Ejemplo visualización medidas de fase para el satélite 3 de GPS

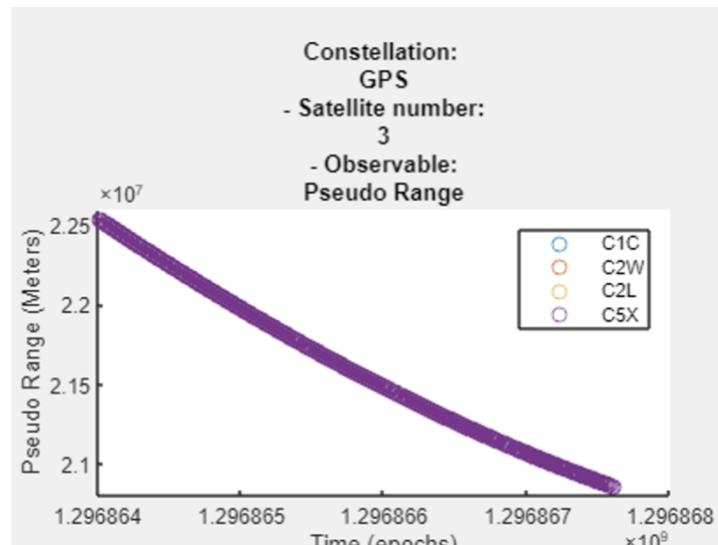


Figura 44. Ejemplo visualización medidas de código (pseudorango) para el satélite 3 de GPS

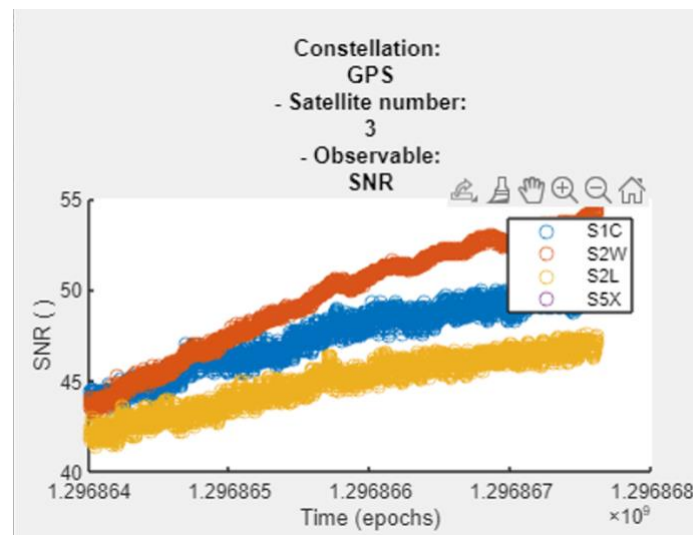


Figura 45. Ejemplo visualización medidas de relación señal a ruido para el satélite 3 de GPS

En el caso de que se seleccione un satélite para el cual no hay información del tipo seleccionado o se haya hecho una selección errónea de las opciones se muestra un mensaje de error para avisar al usuario.

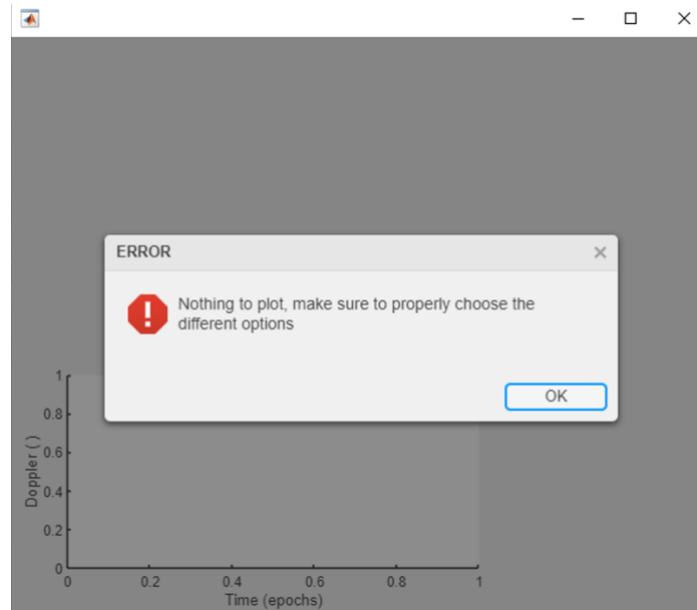


Figura 46. Mensaje de error cuando no hay medidas para visualizar para las opciones escogidas

## I.B. RINEX DE NAVEGACIÓN

La ventana de lectura de RINEX de navegación es la de la Figura 47.

Figura 47. Ventana de lectura y procesado de ficheros RINEX de navegación

Esta ventana tiene una ayuda de explicación para este tipo de ficheros (Figura 48), también abre un enlace a una web interactiva para ver como es el formato de estos ficheros.

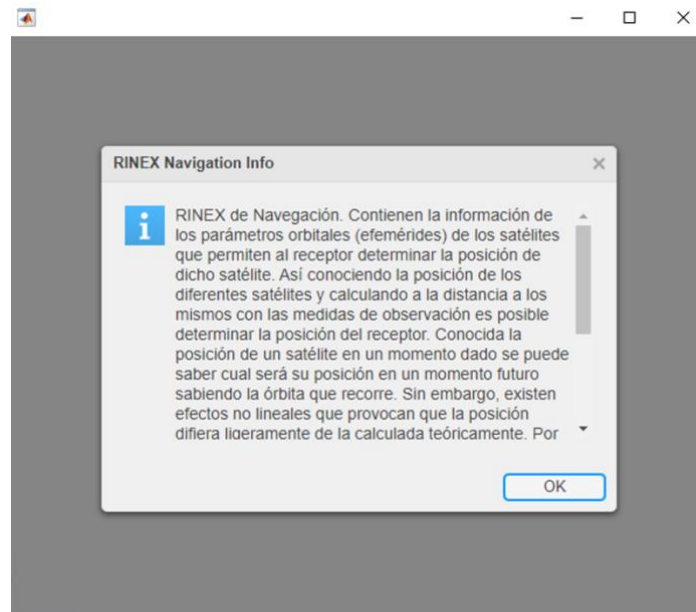


Figura 48. Ayuda ventana RINEX navegación

El proceso de selección y lectura de un fichero RINEX de navegación es igual que en el caso de los RINEX de observaciones. Se muestra en la siguientes figuras (Figura 49, Figura 50 y Figura 51).

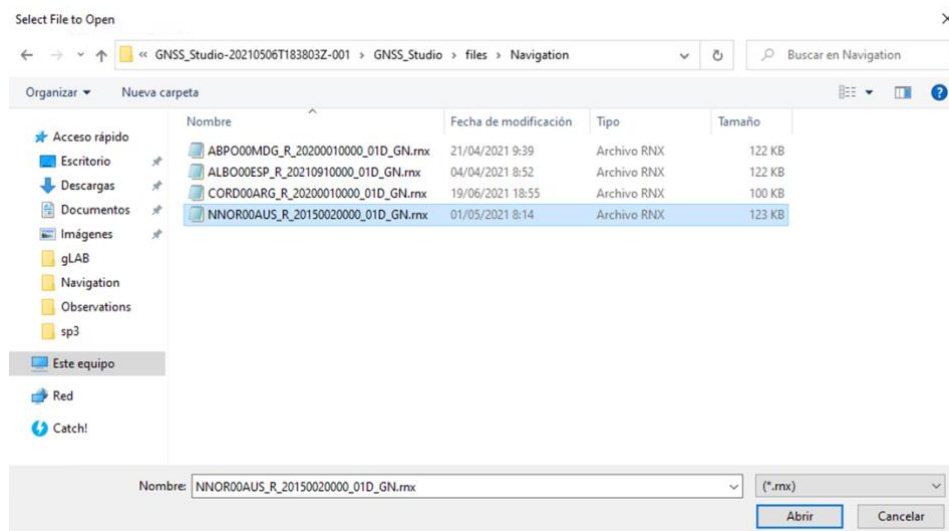
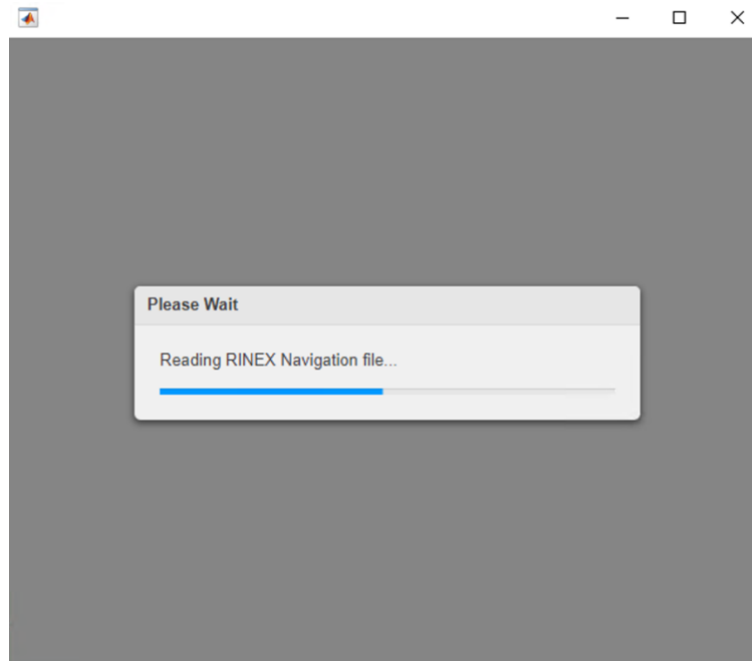
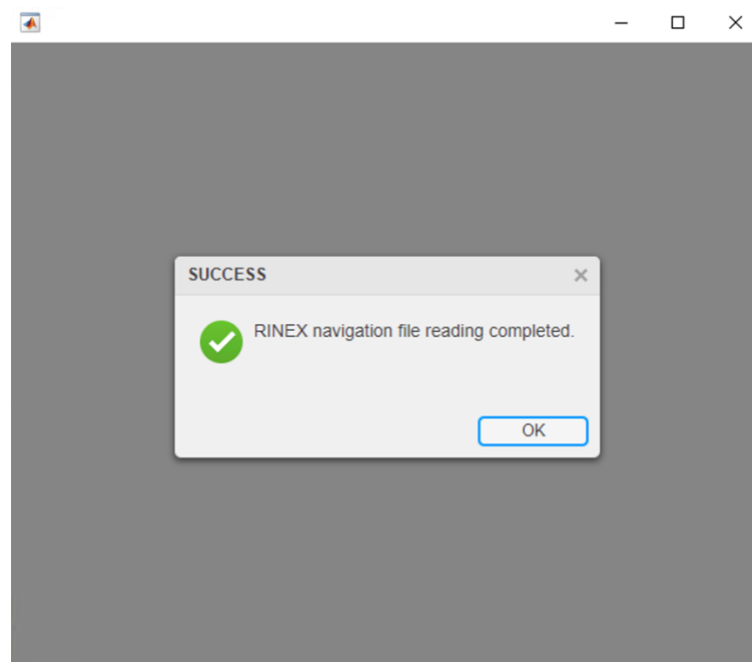


Figura 49. Selección del fichero de navegación a procesar con GNSS Studio





*Figura 50. Ventana proceso de lectura de fichero RINEX de navegación*



*Figura 51. Fichero RINEX de navegación procesado correctamente*

Con este procesado se obtiene las coordenadas de los satélites en ECEF y ECI a partir de las efemérides y parámetros orbitales de los ficheros de navegación. Con los botones 'Plot' y 'Add' se pueden dibujar las órbitas y trazas de los satélites como se ve la Figura 52 y la Figura 53.

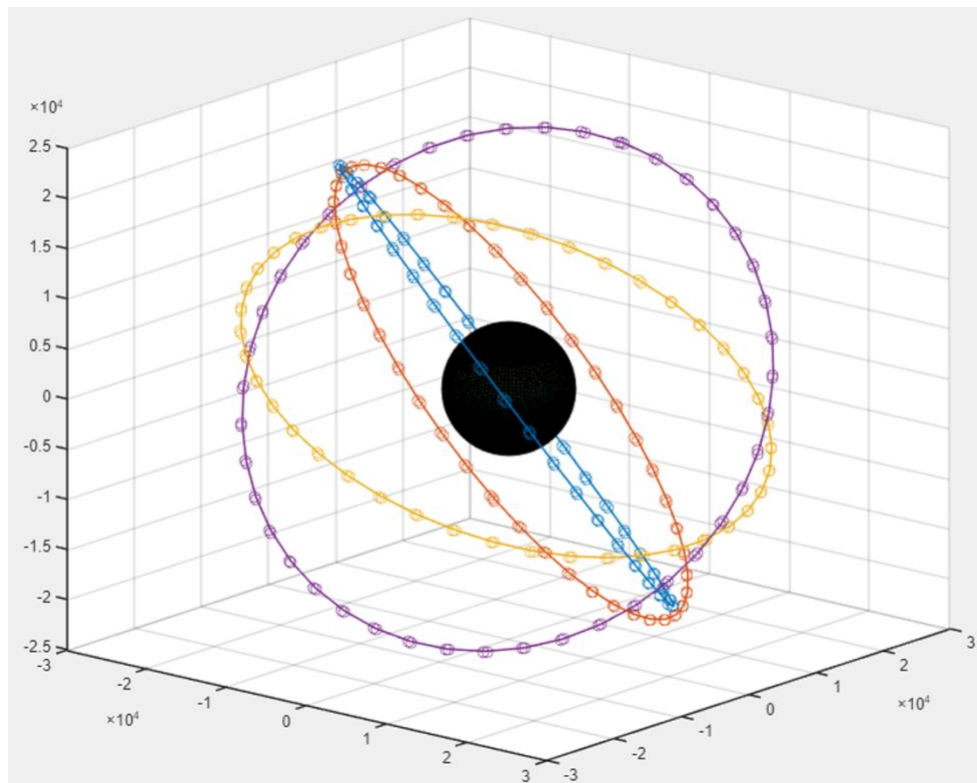


Figura 52. Ejemplo visualización 3D de las órbitas de cuatro satélites GPS a partir de fichero RINEX de navegación

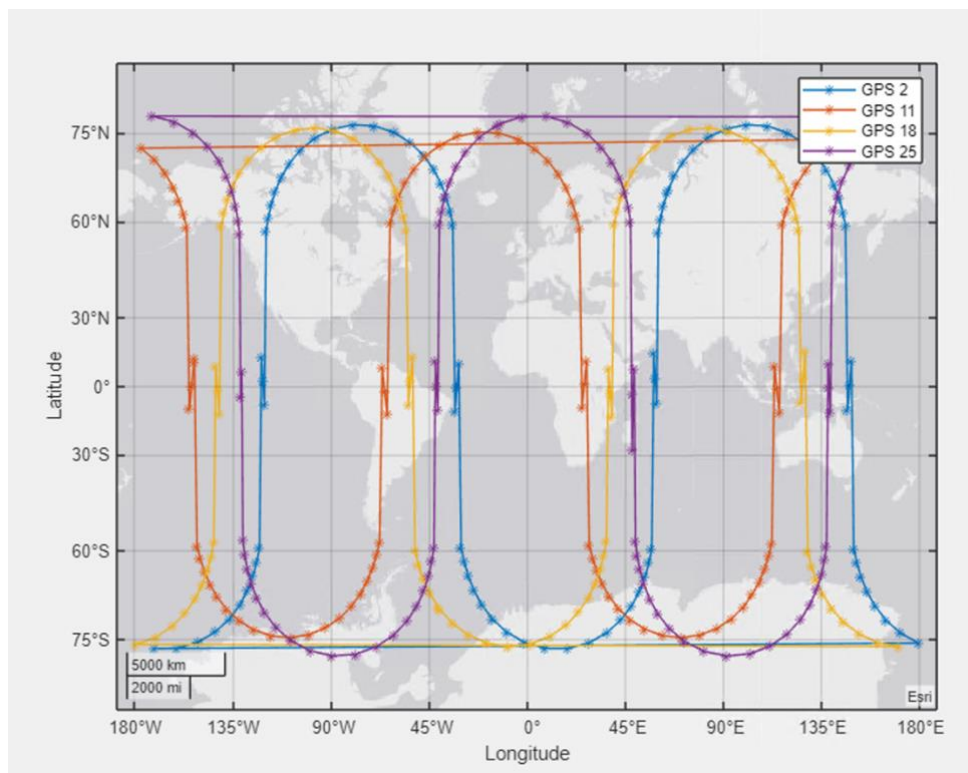


Figura 53. Ejemplo visualización 3D de las trazas de 4 satélites GPS a partir de fichero RINEX de navegación

## I.C. RINEX SP3

La ventana de lectura de RINEX SP3 es la siguiente.

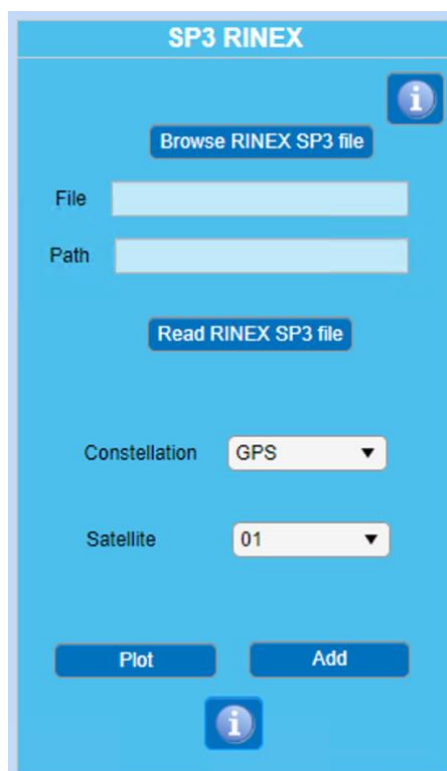


Figura 54. Ventana de lectura y procesado de ficheros RINEX SP3

Las siguientes ayudas están incluidas en esta ventana.

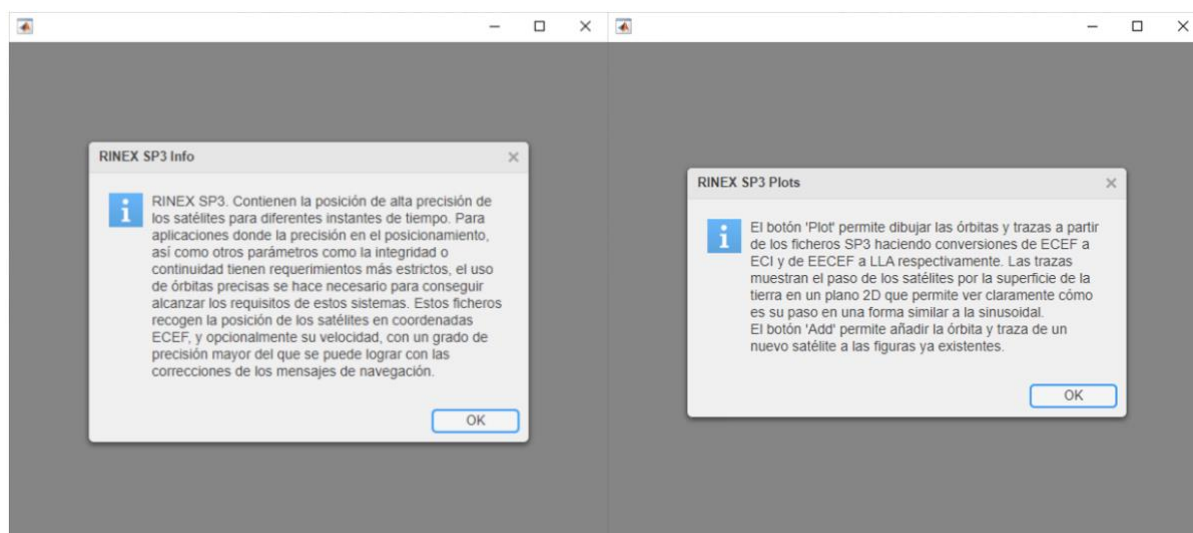


Figura 55. Ayudas en la ventana de procesado de RINEX SP3

La selección de archivos y procesado de los mismos ocurre del mismo modo que con los otros dos tipos de RINEX (ver Figura 56, Figura 57 y Figura 58). Solo se admite la selección de archivos con extensión .sp3 o .eph.

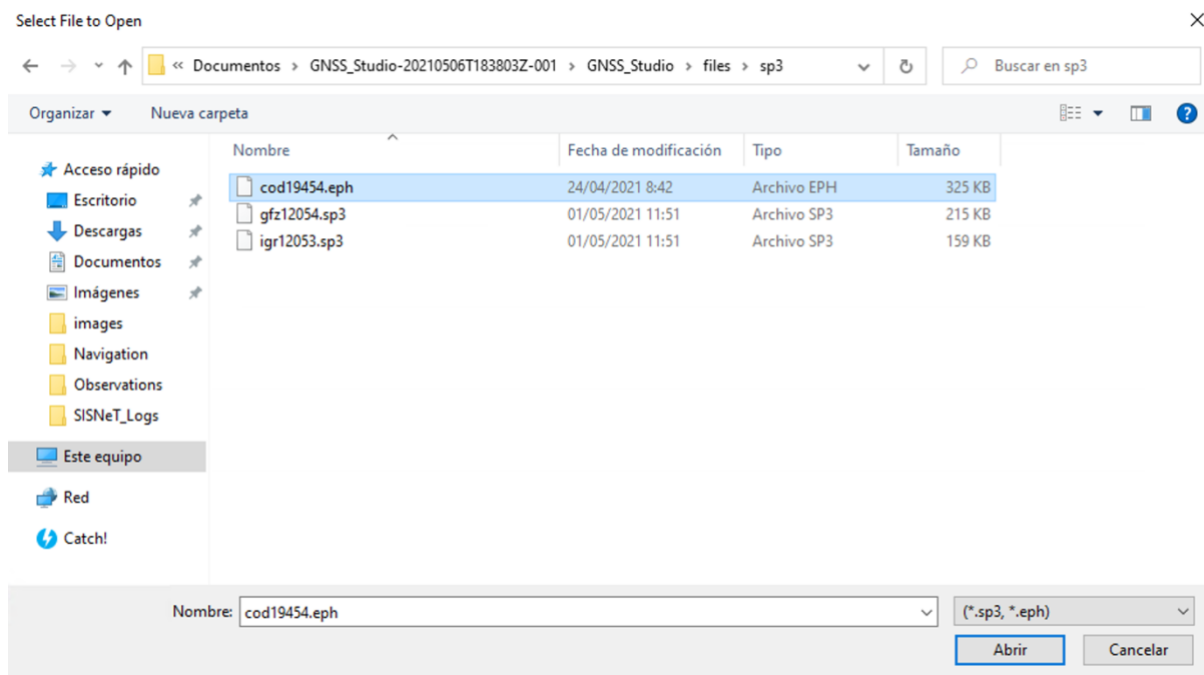


Figura 56. Selección de archivo RINEX SP3

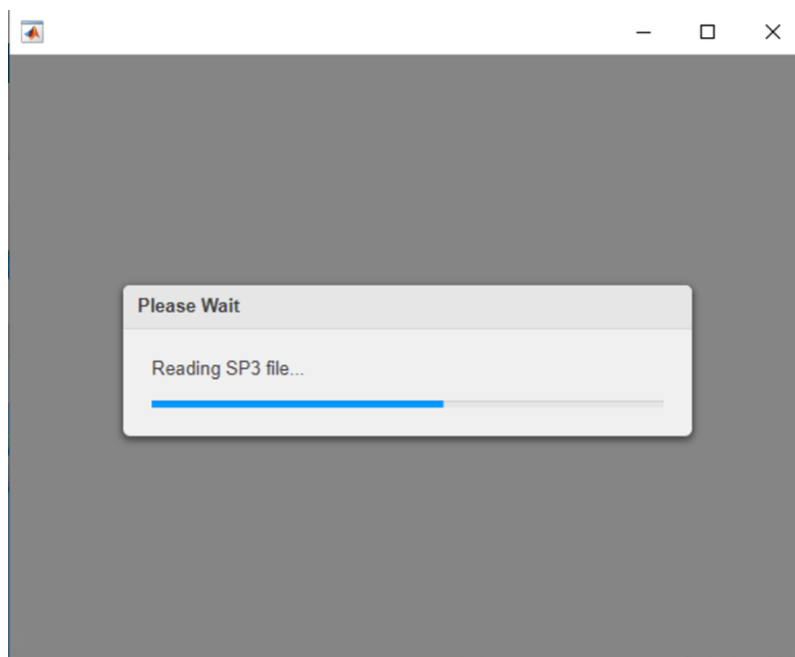


Figura 57. Procesado del fichero RINEX SP3

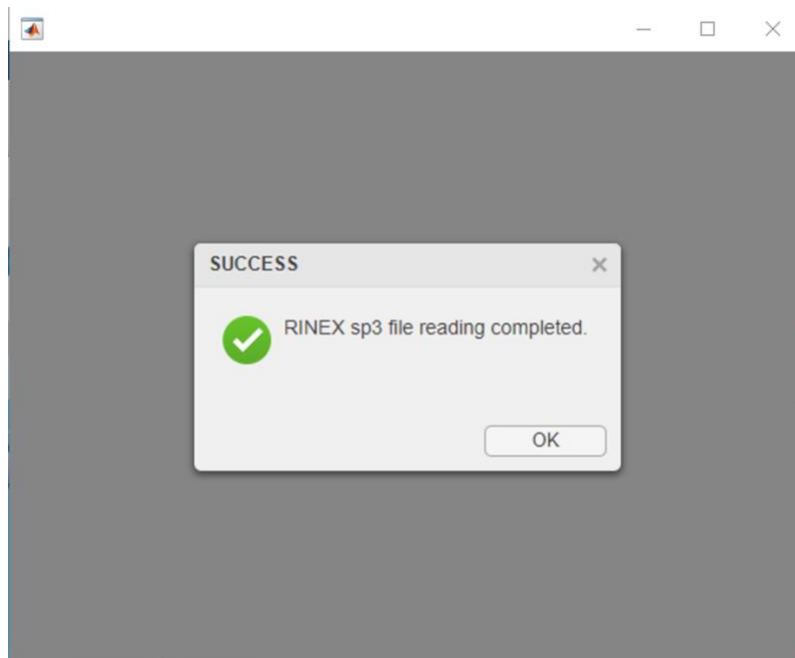


Figura 58. Procesado del fichero RINEX SP3 completada correctamente

Con la selección de la constelación y del satélite se pueden visualizar las órbitas y trazas de los satélites (Figura 59 y Figura 60).

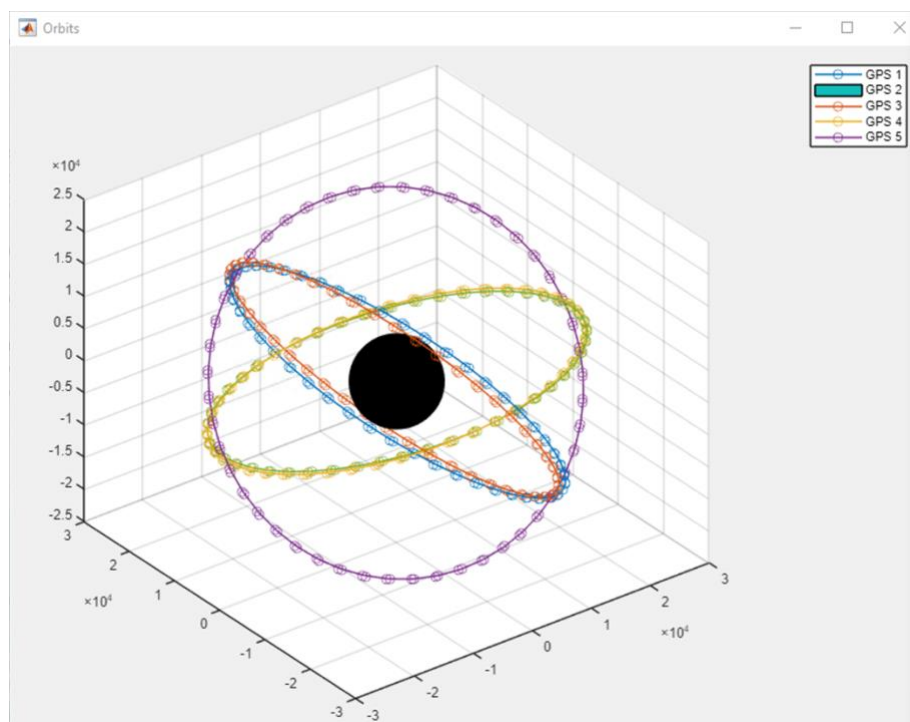


Figura 59. Ejemplo visualización 3D de las órbitas de 5 satélites GPS a partir de fichero SP3

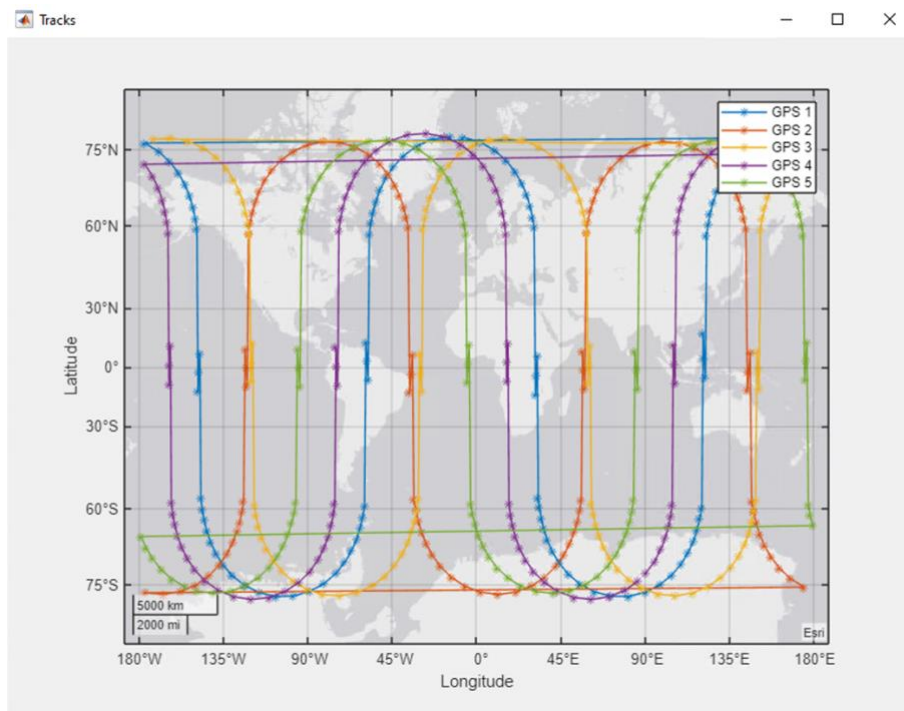


Figura 60. Ejemplo visualización de las trazas de 5 satélites GPS a partir de fichero SP3

## ANEXO II. CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA ‘TOOLS’ DE GNSS STUDIO

En este anexo se detalla el proceso para emplear la herramientas de la pestaña de ‘Tools’ de *GNSS Studio*. Se divide este anexo en cuatro secciones para la cuatro herramientas que hay en ‘Tools’.

### II.A. CONVERSIÓN CRX A RNX Y RNX A CRX

La ventana de compresión y descompresión de RINEX en formato CRX es la siguiente (Figura 61).



Figura 61. Ventana conversión CRX-RNX en GNSS Studio

La selección del archivo a convertir se hace del mismo modo que en la pestaña de procesamiento de ficheros RINEX.

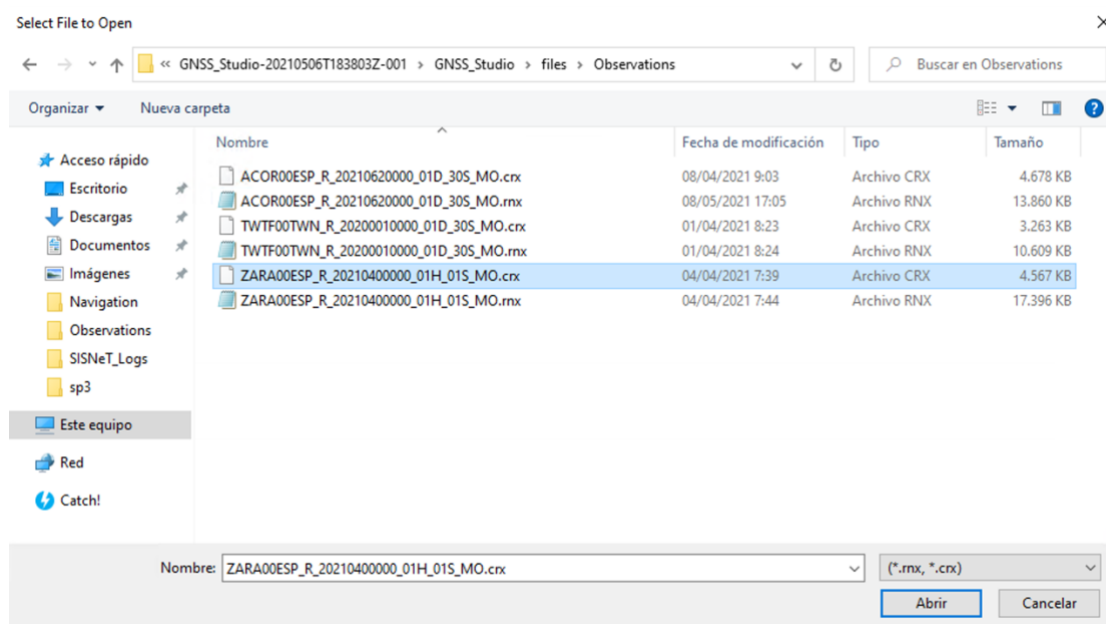
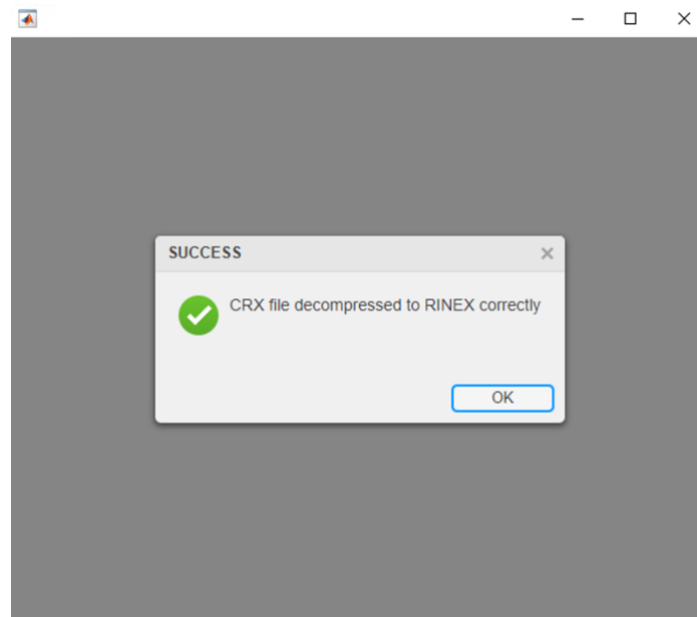


Figura 62. Selección fichero RINEX o CRX a comprimir o descomprimir

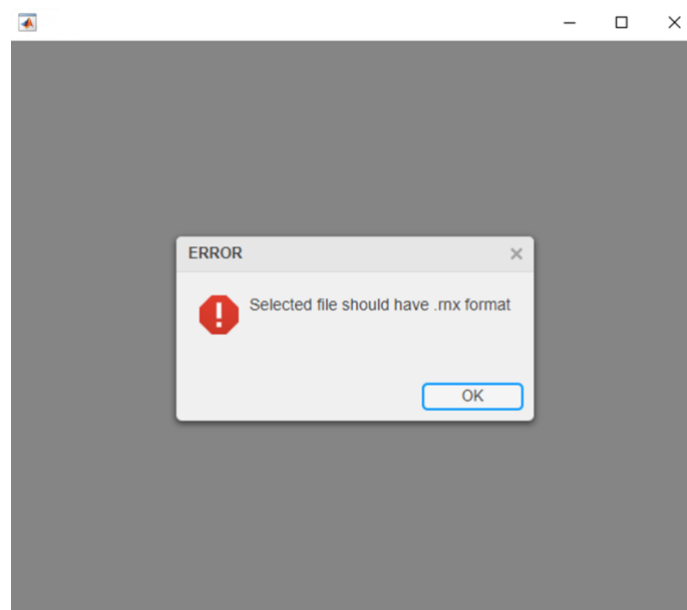


Para hacer la conversión simplemente hay que hacer clic en los botones. Si el proceso se completa sin errores se muestra un mensaje de éxito.



*Figura 63. Ejemplo conversión exitosa CRX-RNX*

En caso de que se intente convertir a .rnx un fichero con extensión diferente a .crx o a .crx un fichero con extensión diferente a .rnx se muestra un mensaje de error.



*Figura 64. Ejemplo intento de conversión de fichero con extensión errónea*

Si ocurre cualquier otro problema en la conversión también se enseña un mensaje de error.

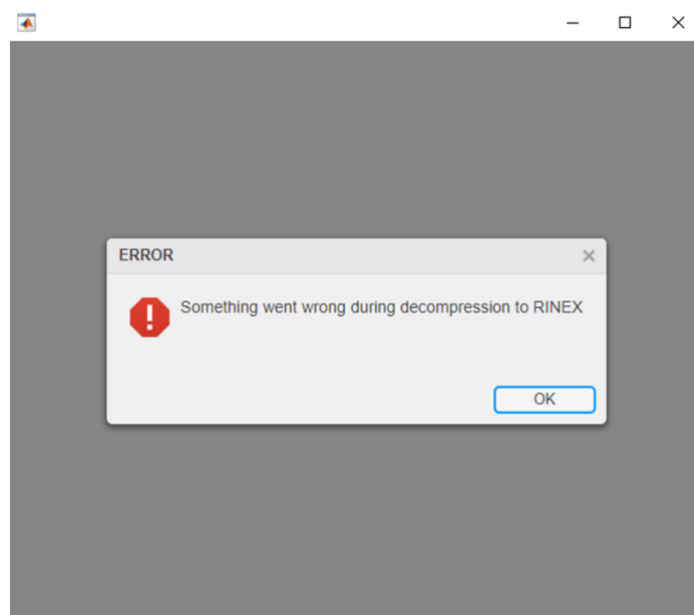


Figura 65. Ejemplo error genérico durante conversión CRX-RNX

## II.B. CONVERSION ENTRE UTC Y TIEMPO GPS

La ventana para esta herramienta es la siguiente.

A window titled "Time Converter" with a blue header. It contains several input fields and buttons. The first row has a label "Month/Day/Year" followed by a text box containing "mm/dd/yyyy" and a dropdown arrow. The second row has a label "Hour:Minute:Second" followed by a text box containing "00:00:00". Below these are two buttons: "To GPS" and "To UTC". Under the buttons are three more rows, each with a label and a text box: "GPS Epoch" with "0", "Week Number" with "0", and "Time Of Week" with "0".

Figura 66. Ventana conversión UTC-GPS Time

Para obtener el tiempo GPS a partir de la hora UTC se debe seleccionar el día y la hora con los selectores y hacer clic en 'To GPS'.

Time Converter (Left - To GPS)		Time Converter (Right - To UTC)	
Month/Day/Year	14-Jun-2021	Month/Day/Year	14-Jun-2021
Hour:Minute:Second	22:03:22	Hour:Minute:Second	22:03:22
To GPS	To UTC	To GPS	To UTC
GPS Epoch	0	GPS Epoch	1307743420
Week Number	0	Week Number	2162
Time Of Week	0	Time Of Week	165820

Figura 67. Selección de tiempo UTC y conversión a tiempo GPS

Para el cambio de tiempo GPS a UTC se debe rellenar solo el campo de la época GPS o bien el numero de la semana ('Week Number') y el tiempo en la semana ('Time of week'). Si por ejemplo añadimos 30 segundos a la época obtenida en la Figura 67 se obtiene el resultado de la Figura 68 y vemos que efectivamente son 30 segundos más.

Time Converter	
Month/Day/Year	14-Jun-2021
Hour:Minute:Second	22:03:22
To GPS	To UTC
GPS Epoch	1307743450
Week Number	2162
Time Of Week	165820

UTC Time

✓ Date: 2021-6-14 Time: 22:3:52

OK

Figura 68. Selección de tiempo GPS y conversión a UTC

## II.C. CONVERSIÓN DE EFEMÉRIDES A LLA

La ventana de esta herramienta es la siguiente (Figura 69) y viene con unos valores de ejemplo por defecto.

**Ephemeris to LLA**

Month/Day/Year: mm/dd/yyyy

Hour:Minute:Second: 00:00:00

a: 4.217e+0      o: 0.03924

e: 0.000151      w: 0.03924

i: 0.03924      M: 0.03924

Get LLA

Figura 69. Ventana conversión de efemérides a LLA de GNSS Studio

Tras completar también los campos de fecha y hora y modificar las efemérides se puede obtener las coordenadas en longitud, latitud, altura (Figura 70).

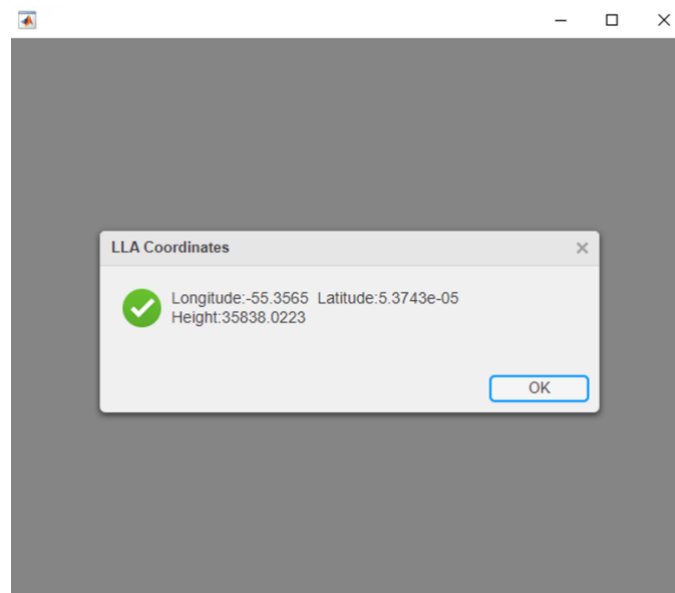


Figura 70. Resultado conversión de efemérides a LLA

## II.D. CONVERSIÓN ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS

La ventana de conversión entre NEU, ECEF y LLA es la siguiente (Figura 71).

Coordinate Converter

East

X

Lon

North

To ENU

Y

To LLA

Lat

Up

To ECEF

Z

To ECEF

Height

Coordinate Origin

lat0,lon0,h0

Figura 71. Ventana conversión de coordenadas de GNSS Studio

Para la conversión de unos sistemas de coordenadas a otros simplemente hay que rellenar las coordenadas de inicio y haciendo clic en el botón correspondiente se obtienen en el sistema final. En la Figura 72 se muestra un ejemplo de cambio de LLA a ECEF y luego a NEU.

Coordinate Converter

East

X

Lon

50

North

To ENU

Y

To LLA

Lat

-50

Up

To ECEF

Z

To ECEF

Height

50000

Coordinate Origin

lat0,lon0,h0

Coordinate Converter

East

X

2661142.935

Lon

50

North

To ENU

Y

-3171426.654

To LLA

Lat

-50

Up

To ECEF

Z

4901091.259

To ECEF

Height

50000

Coordinate Origin

lat0,lon0,h0

Coordinate Converter

East

X

2661142.935

Lon

50

North

To ENU

Y

-3171426.654

To LLA

Lat

-50

Up

To ECEF

Z

4901091.259

To ECEF

Height

50000

Coordinate Origin

20,25,550

Coordinate Converter

East

-3998936.274

X

2661142.935

Lon

50

North

4239054.418

To ENU

Y

-3171426.654

To LLA

Lat

-50

Up

2676237.976

To ECEF

Z

4901091.259

To ECEF

Height

50000

Coordinate Origin

20,25,550

Figura 72. Ejemplo cambio de coordenadas

## ANEXO III. CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA ‘GLAB’ DE GNSS STUDIO

Este anexo se divide en dos secciones, la primera muestra las ayudas que hay en *GNSS Studio* para facilitar el uso de *gLAB*, y en la segunda se muestran las imágenes que se deberían obtener durante la realización de los ejercicios del apartado dedicado a dicho tema.

### III.A. AYUDAS PARA GLAB EN GNSS STUDIO

En esta sección se adjuntan capturas de las ayudas que se han incluido en *GNSS Studio* para facilitar el uso de *gLAB* (de la Figura 73 a la Figura 89). Además de las ventanas emergentes en muchos casos se abren enlaces interesantes en el navegador web por defecto, como por ejemplo enlaces con explicaciones a cerca del formato de cada uno de los archivos de entrada de *gLAB*.

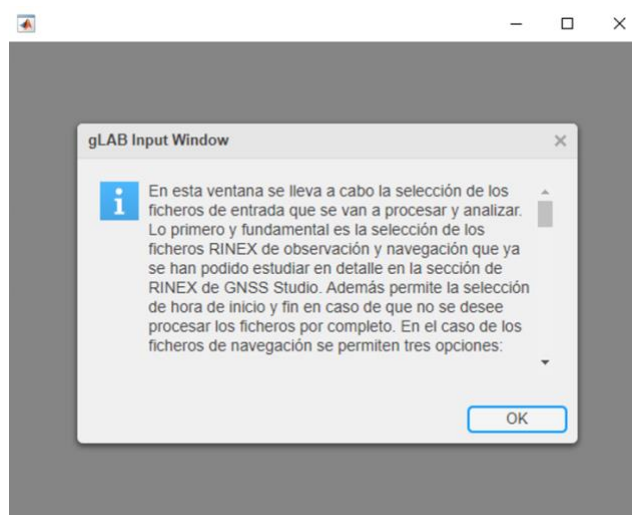


Figura 73. Ayuda gLAB Input Window en GNSS Studio

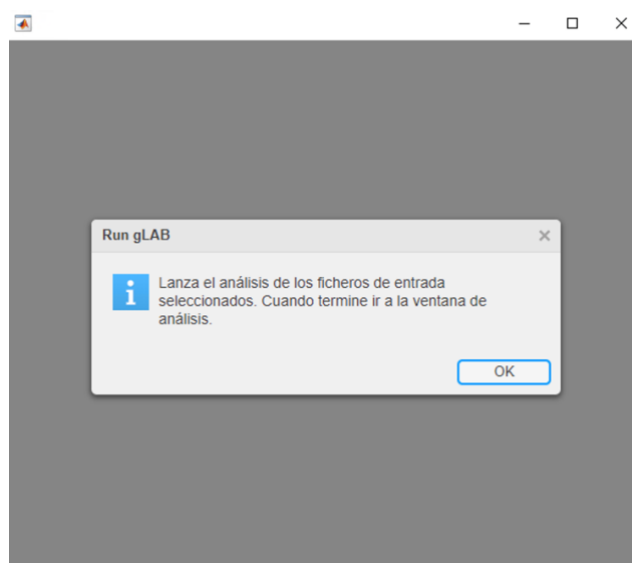


Figura 74. Ayuda Run gLAB en GNSS Studio

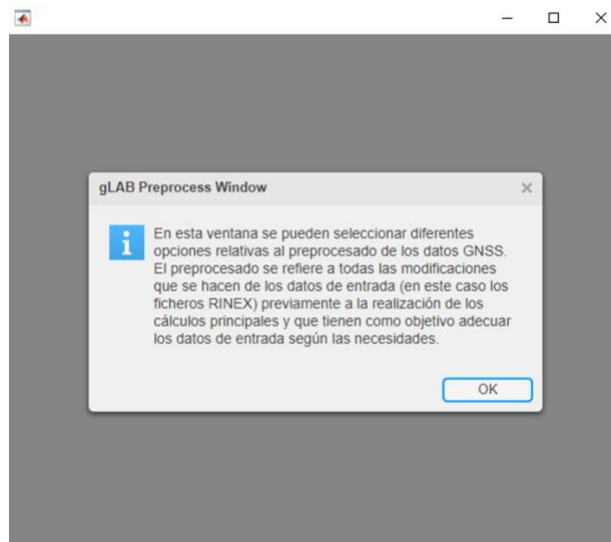


Figura 75. Ayuda gLAB Preprocess Window en GNSS Studio

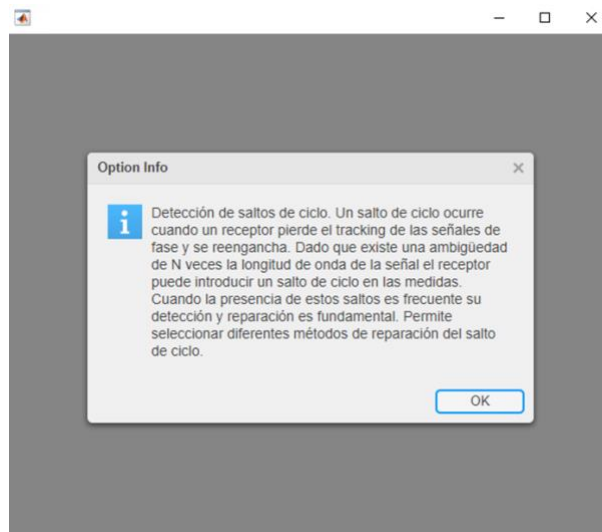


Figura 76. Ayuda saltos de ciclo gLAB en GNSS Studio

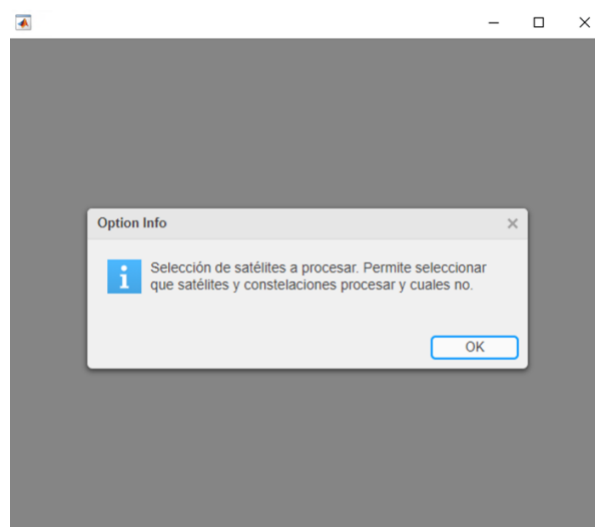


Figura 77. Ayuda selección satélites gLAB en GNSS Studio



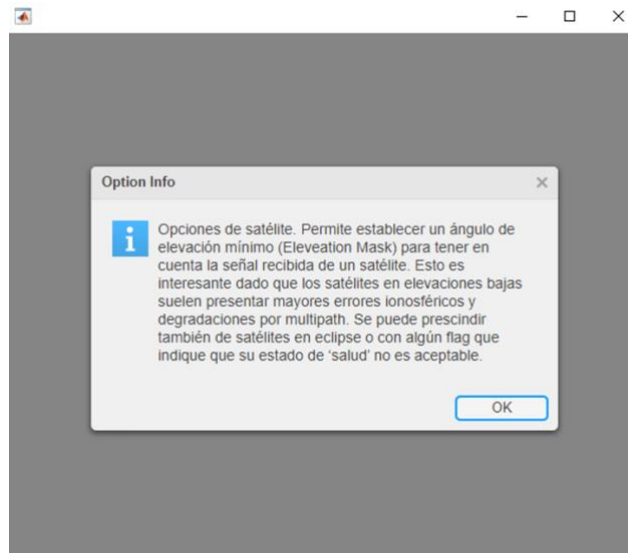


Figura 78. Ayuda opciones de satélite gLAB en GNSS Studio

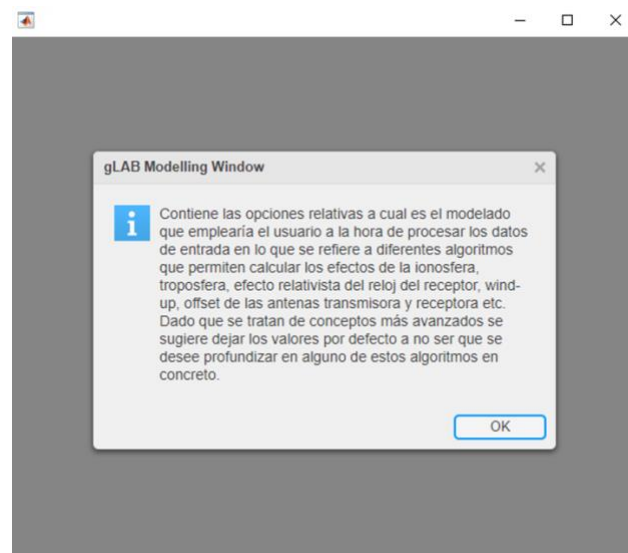


Figura 79. Ayuda gLAB Modelling Window en GNSS Studio

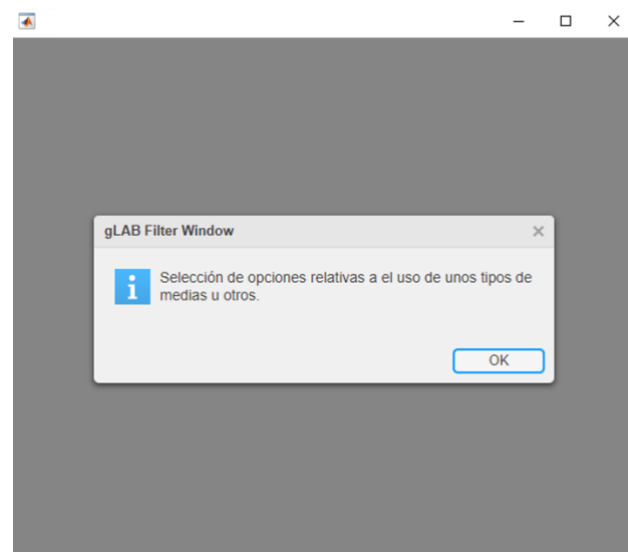


Figura 80. Ayuda gLAB Filter Window en GNSS Studio

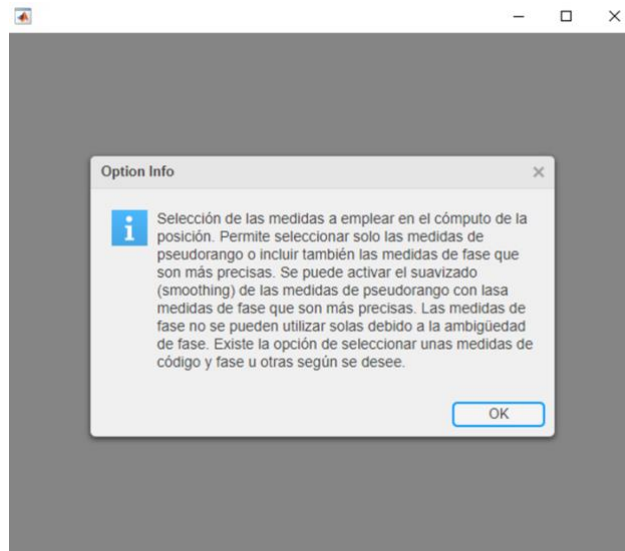


Figura 81. Ayuda opciones filtrado gLAB en GNSS Studio

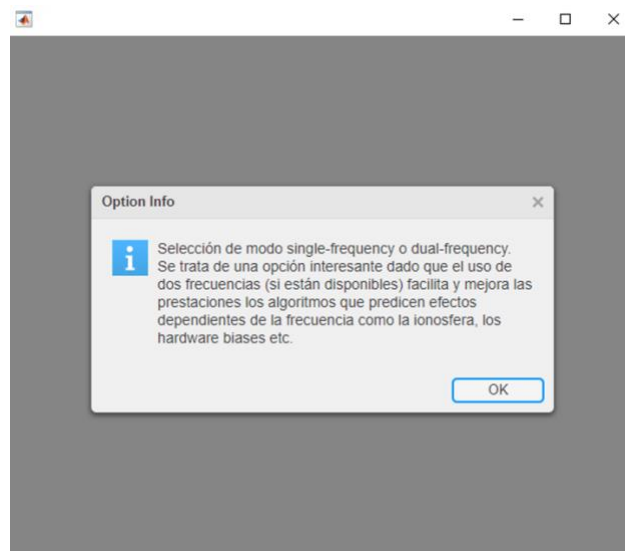


Figura 82. Ayuda procesado single vs dual frequency gLAB en GNSS Studio

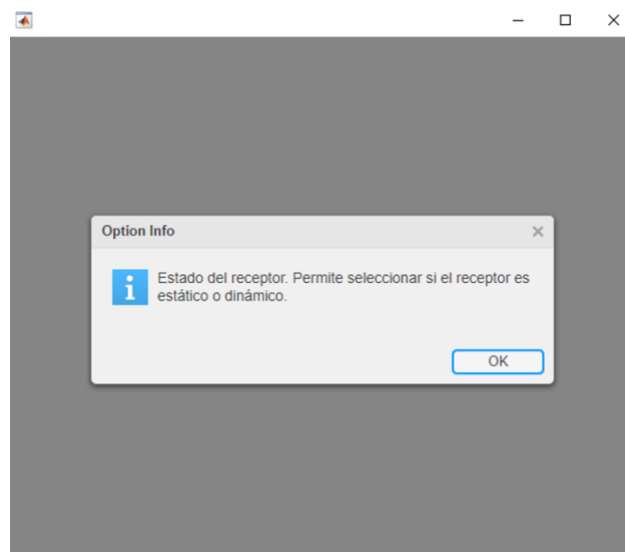


Figura 83. Ayuda procesado estático vs dinámico gLAB en GNSS Studio

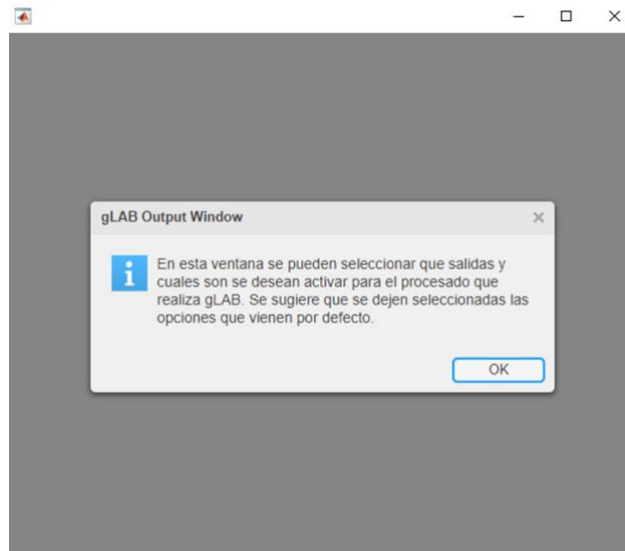


Figura 84. Ayuda gLAB Output Window en GNSS Studio

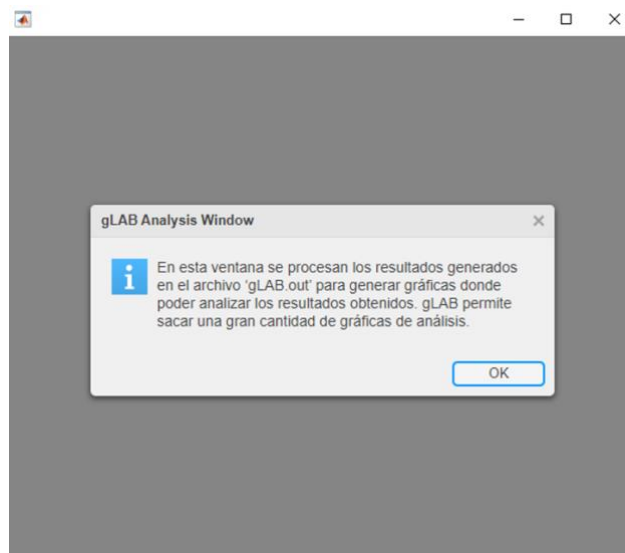


Figura 85. Ayuda gLAB Analysis Window en GNSS Studio

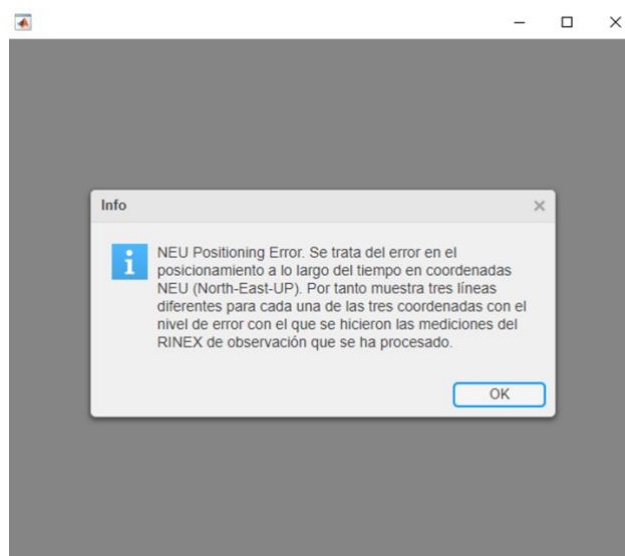


Figura 86. Ayuda gráfica de salida posición NEU gLAB en GNSS Studio

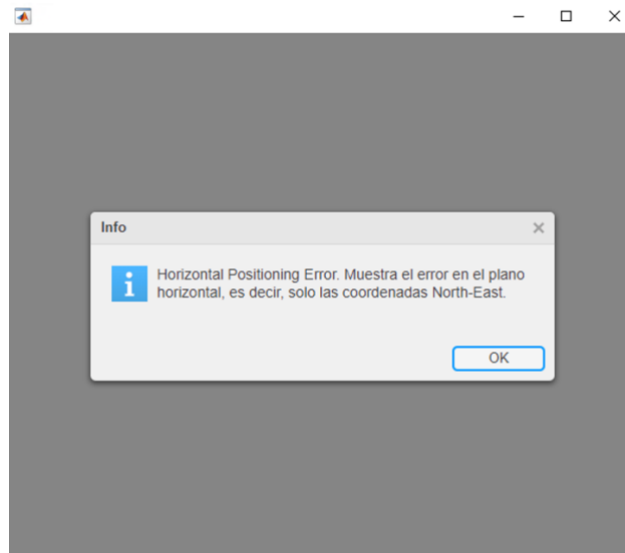


Figura 87. Ayuda gráfica de salida error de posición horizontal gLAB en GNSS Studio

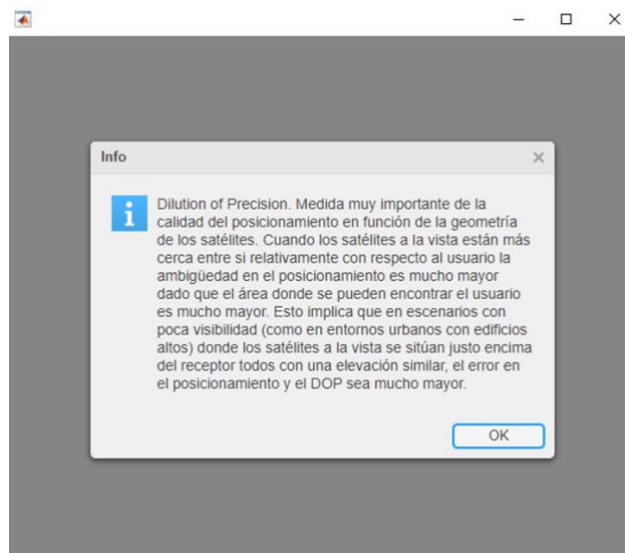


Figura 88. Ayuda gráfica de salida DOP de gLAB en GNSS Studio

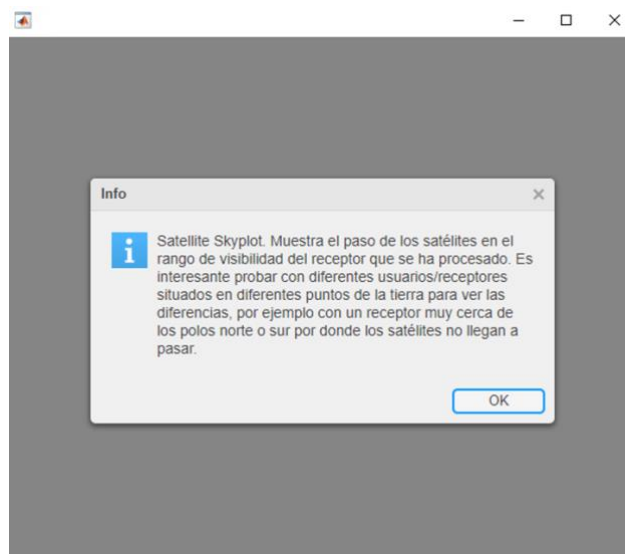


Figura 89. Ayuda gráfica de salida skyplot de gLAB en GNSS Studio

### III.B. IMÁGENES GLAB DE LA SECCIÓN DE EJERCICIOS

En esta sección de este anexo se incluyen las diferentes imágenes que se obtienen con la realización de los ejercicios propuestos en la sección de ejercicios (de la Figura 90 a la Figura 111).

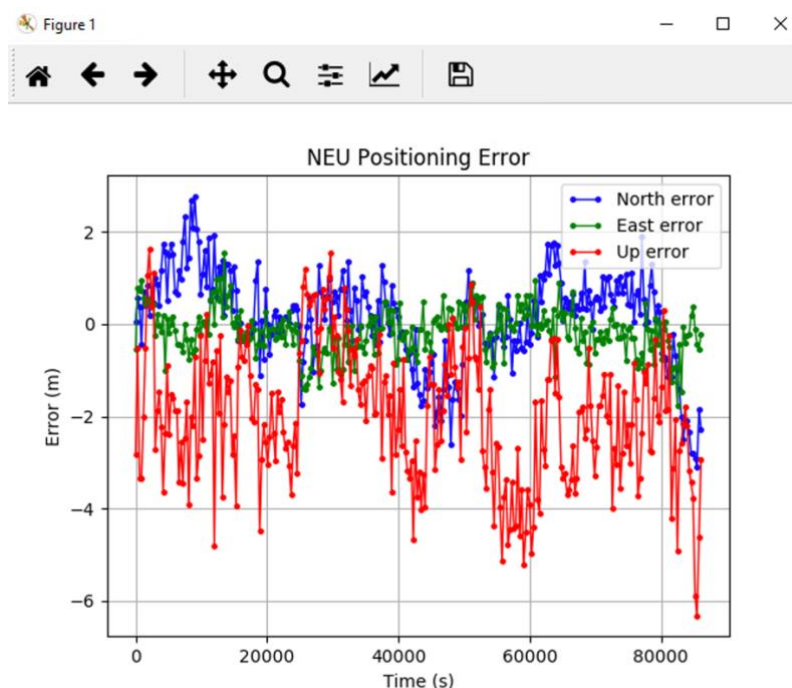


Figura 90. Error de posicionamiento NEU receptor Madrid modo dinámico

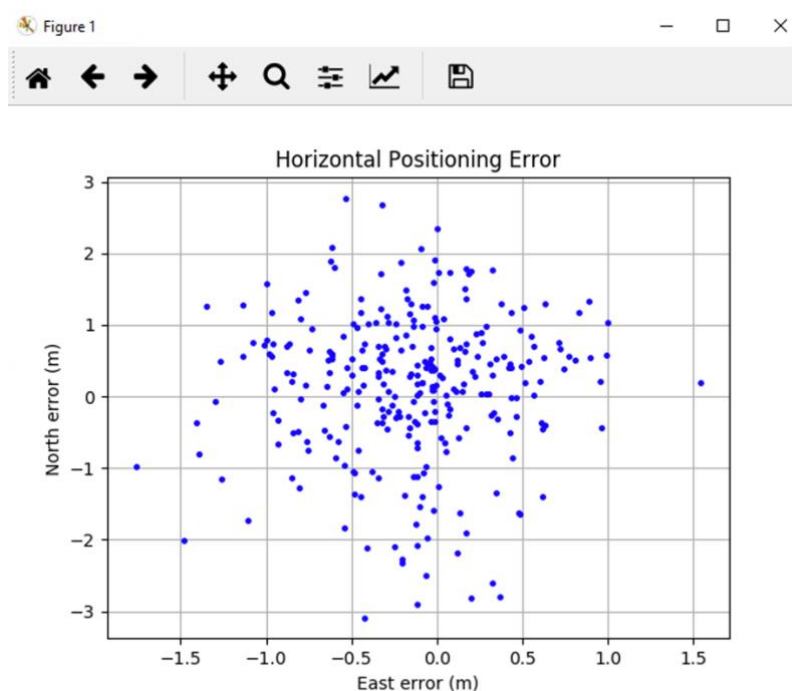


Figura 91. Error de posicionamiento horizontal receptor Madrid modo dinámico

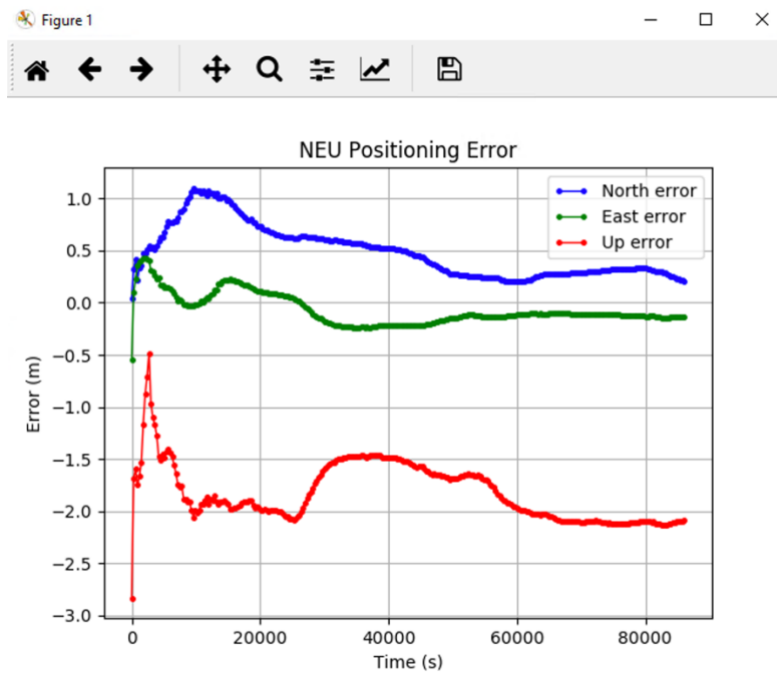


Figura 92. Error de posicionamiento NEU receptor Madrid modo estático

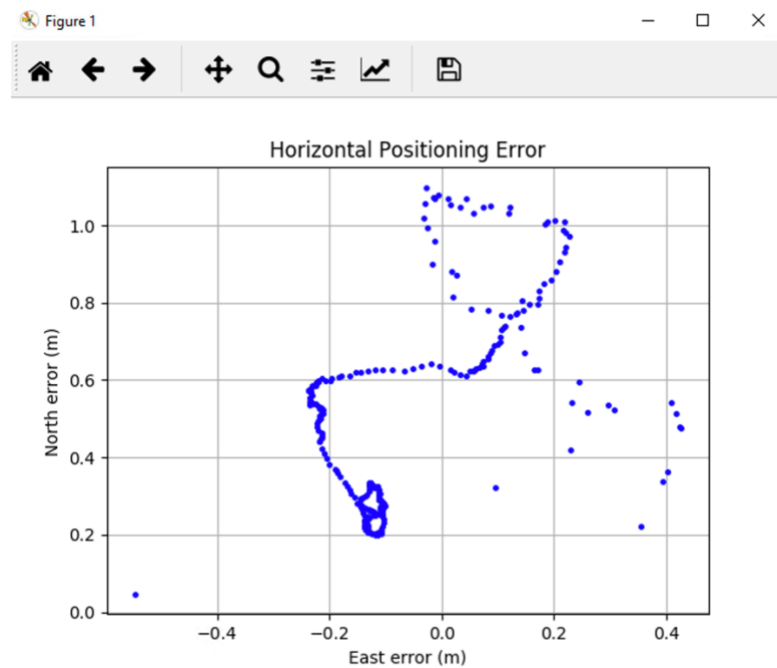


Figura 93. Error de posicionamiento horizontal receptor Madrid modo estático

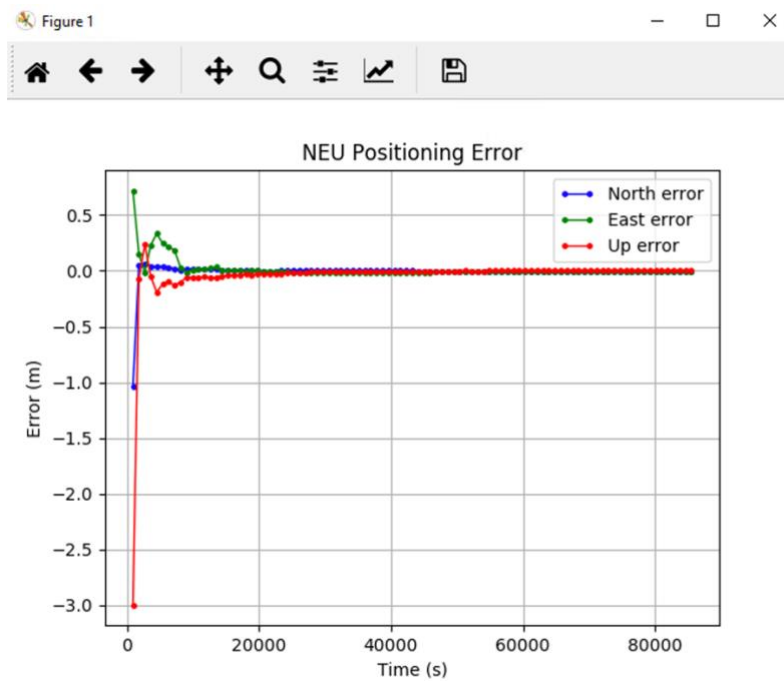


Figura 94. Error de posicionamiento NEU receptor Madrid modo PPP estático

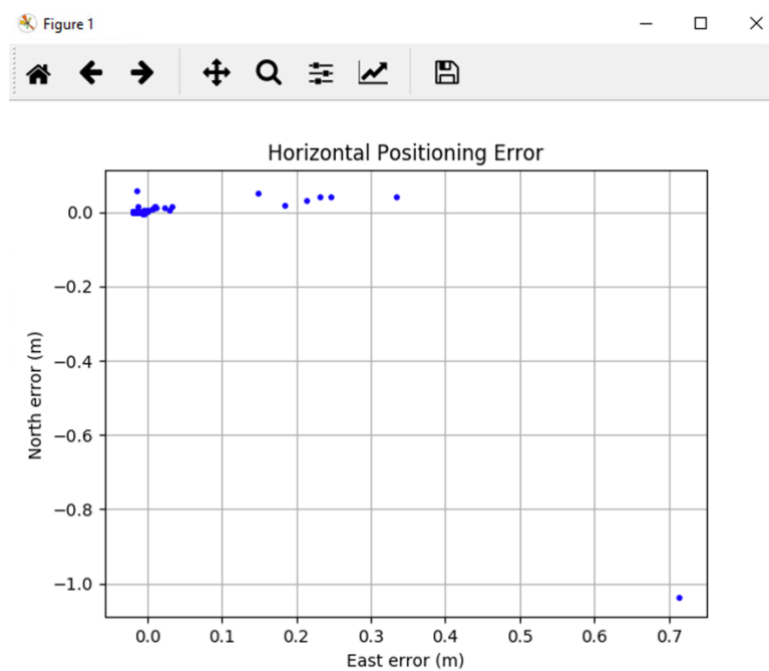


Figura 95. Error de posicionamiento horizontal receptor Madrid modo PPP estático



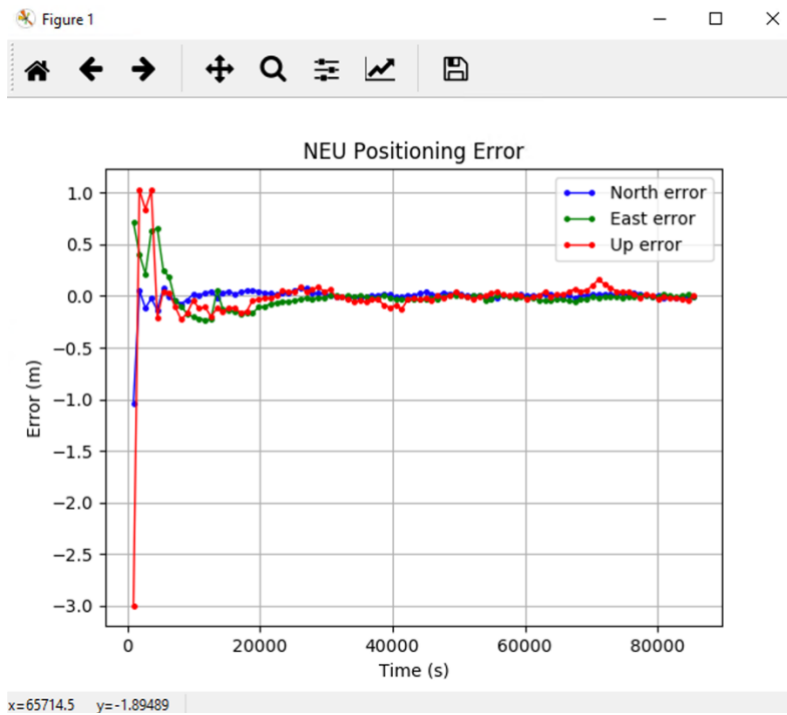


Figura 96. Error de posicionamiento NEU receptor Madrid modo PPP dinámico

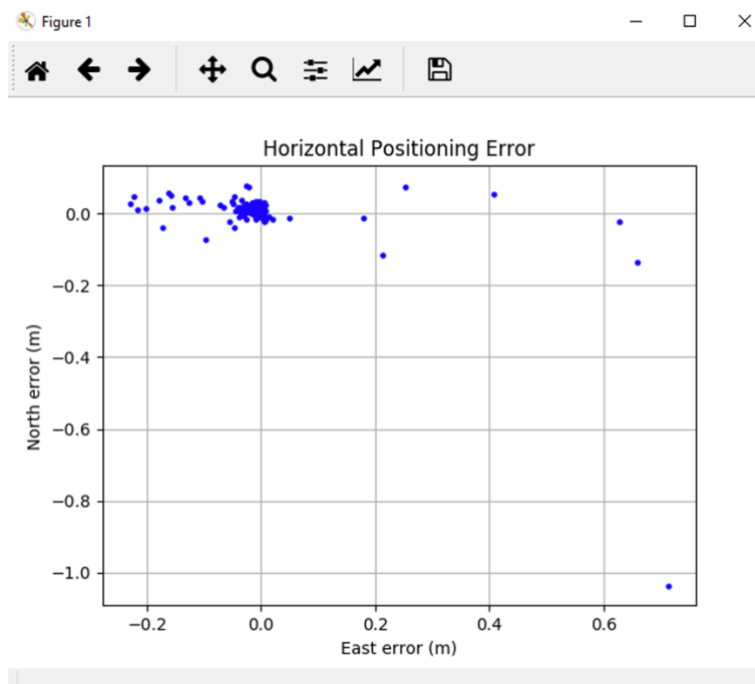


Figura 97. Error de posicionamiento horizontal receptor Madrid modo PPP dinámico

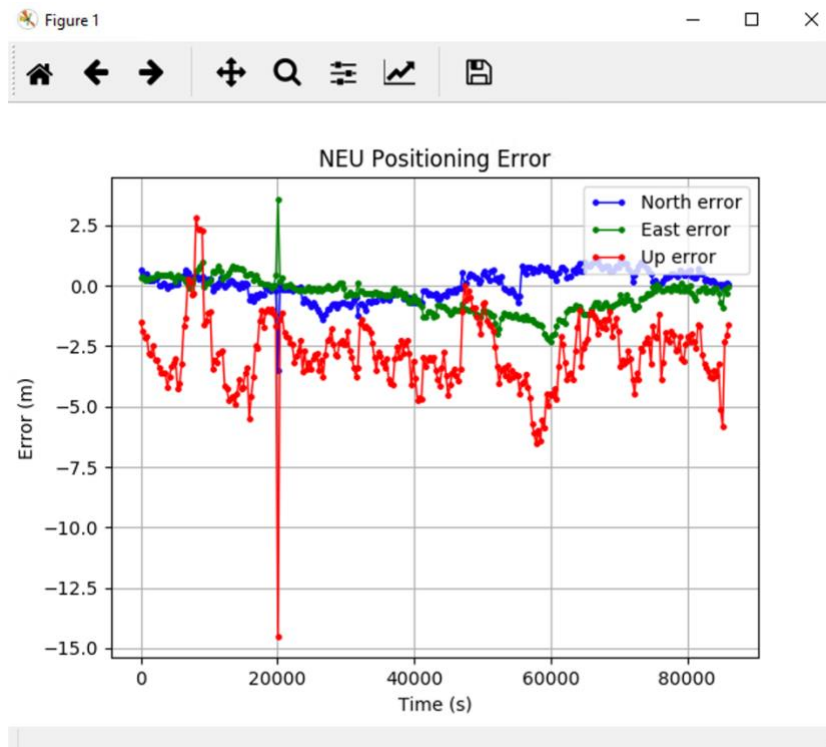


Figura 98. Error de posicionamiento NEU receptor cerca del polo norte modo SPP dinámico

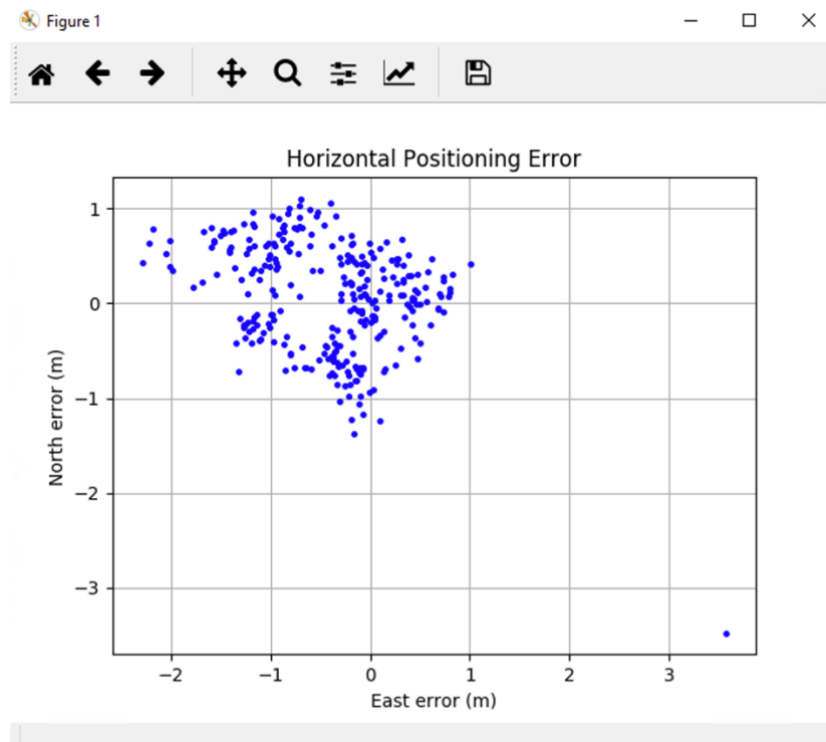


Figura 99. Error de posicionamiento horizontal receptor cerca del polo norte modo SPP dinámico

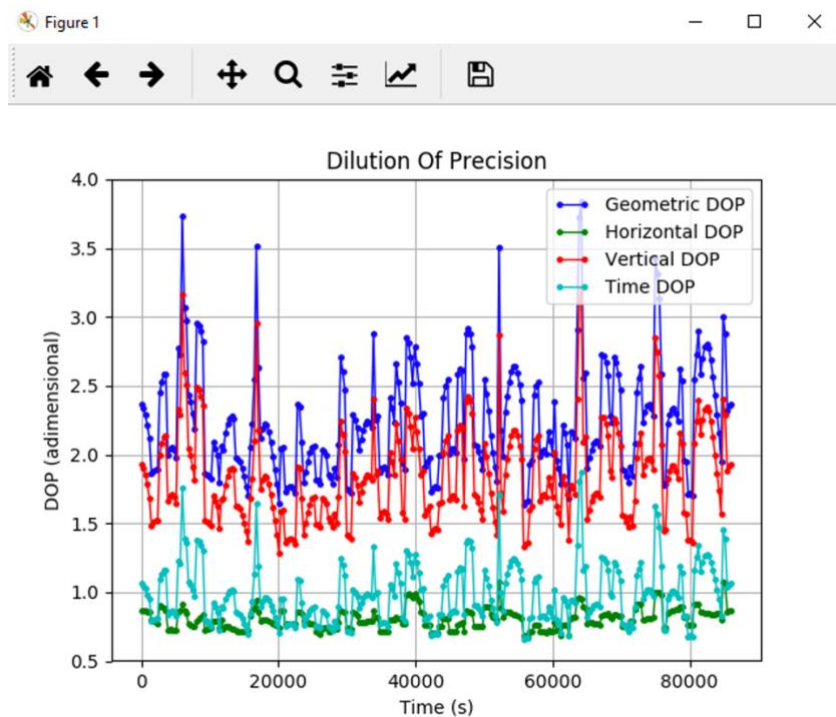


Figura 100. Dilution Of Precision receptor cerca del polo norte modo SPP dinámico

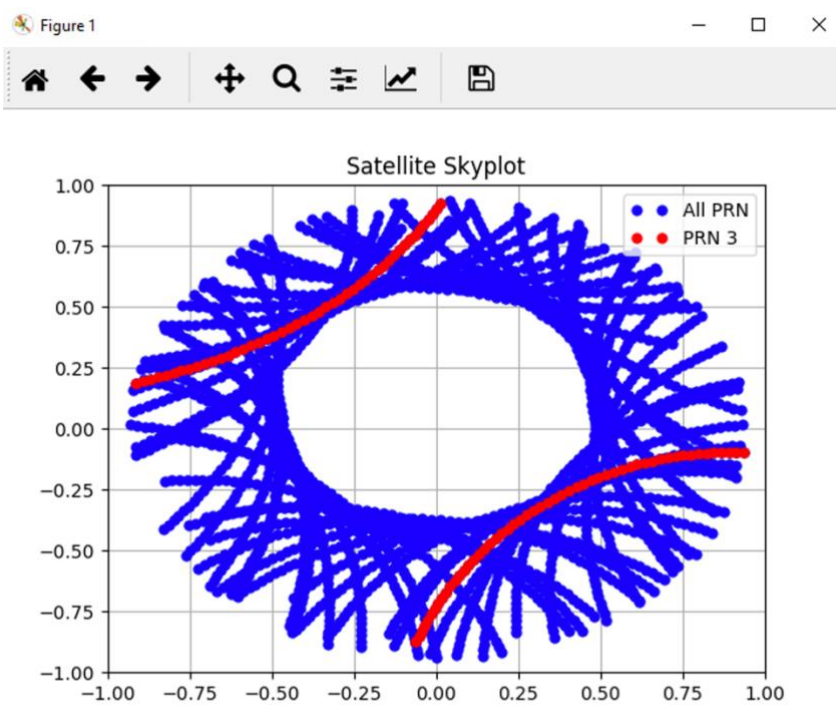


Figura 101. Skyplot receptor cerca del polo norte modo SPP dinámico

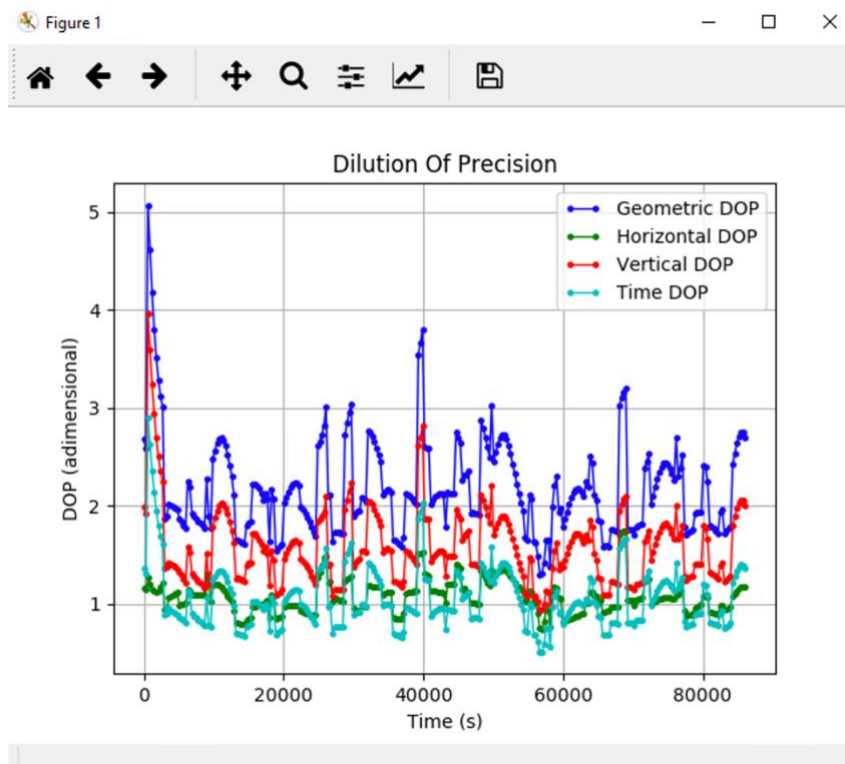


Figura 102. Dilution Of Precision receptor Madrid modo SPP dinámico

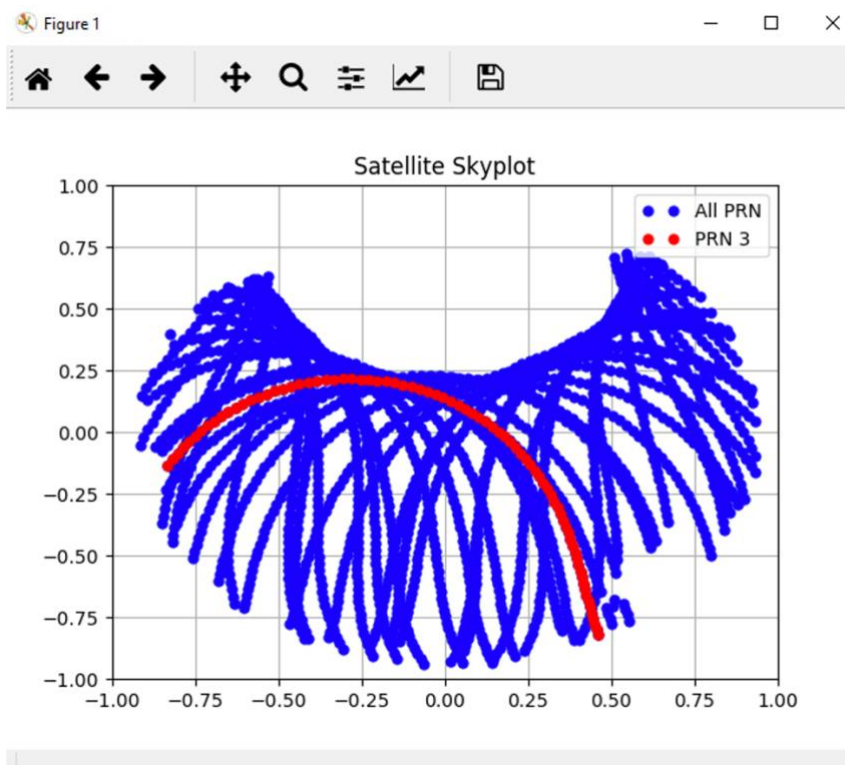


Figura 103. Skyplot receptor Madrid modo SPP dinámico

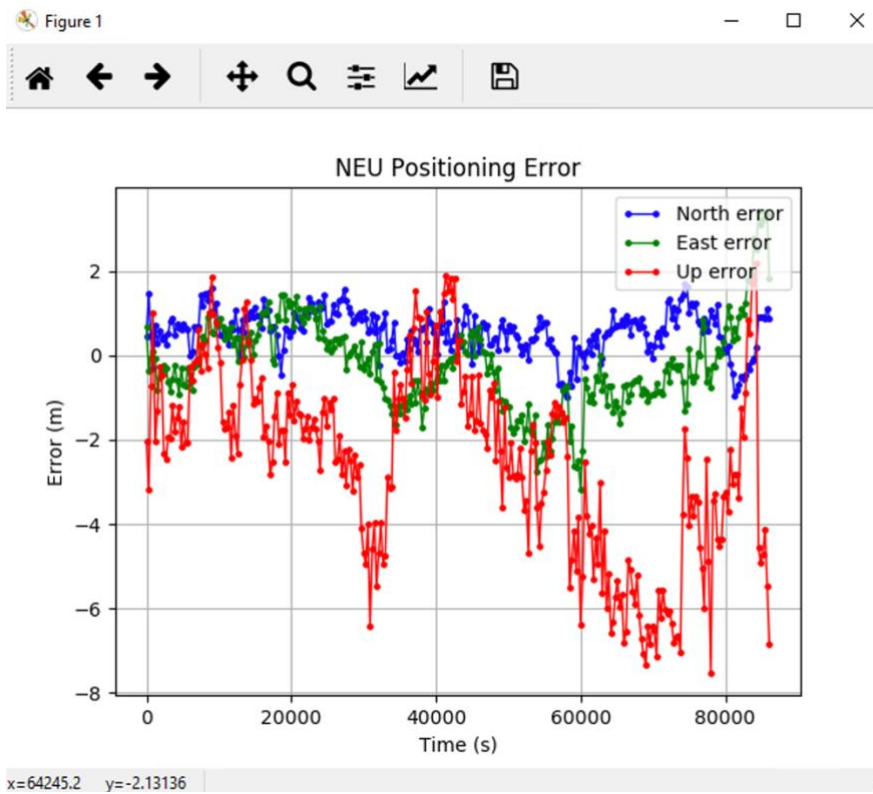


Figura 104. Error de posicionamiento NEU receptor cerca del Ecuador modo SPP dinámico

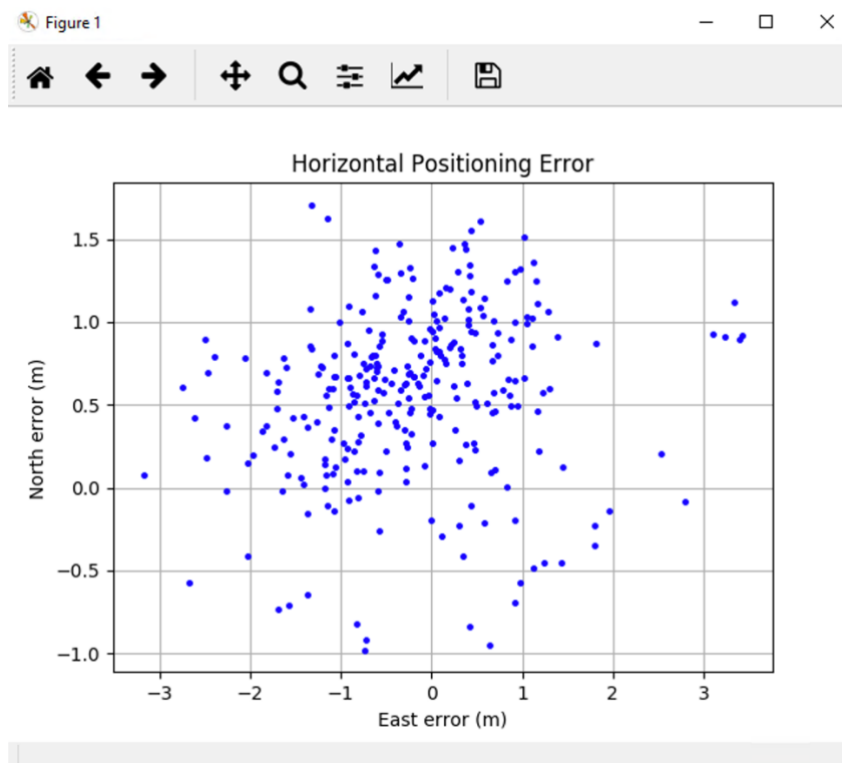


Figura 105. Error de posicionamiento horizontal receptor cerca del Ecuador modo SPP dinámico

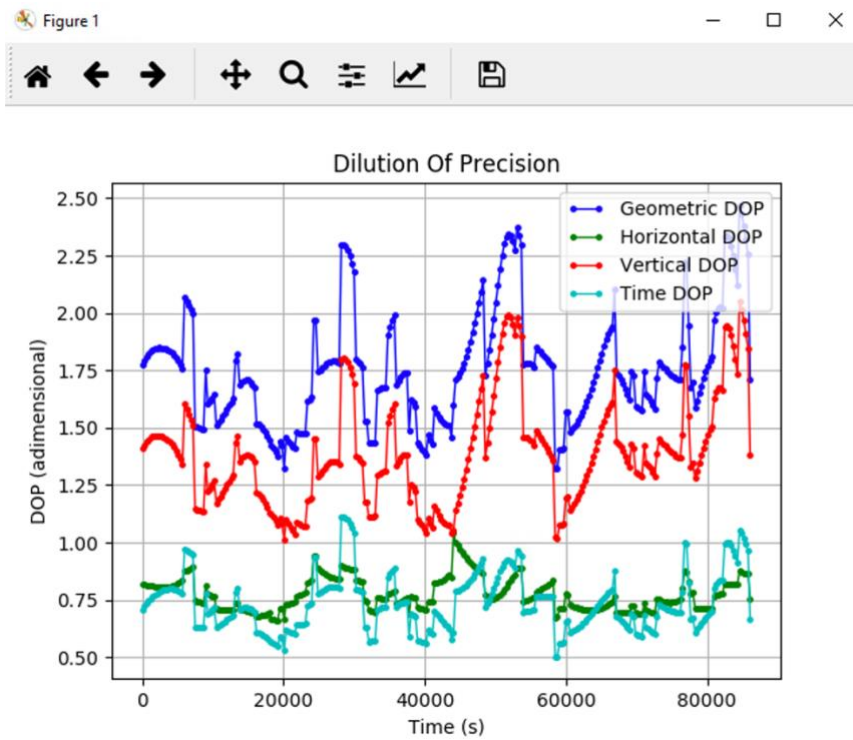


Figura 106. Dilution Of Precision receptor cerca del Ecuador modo SPP dinámico

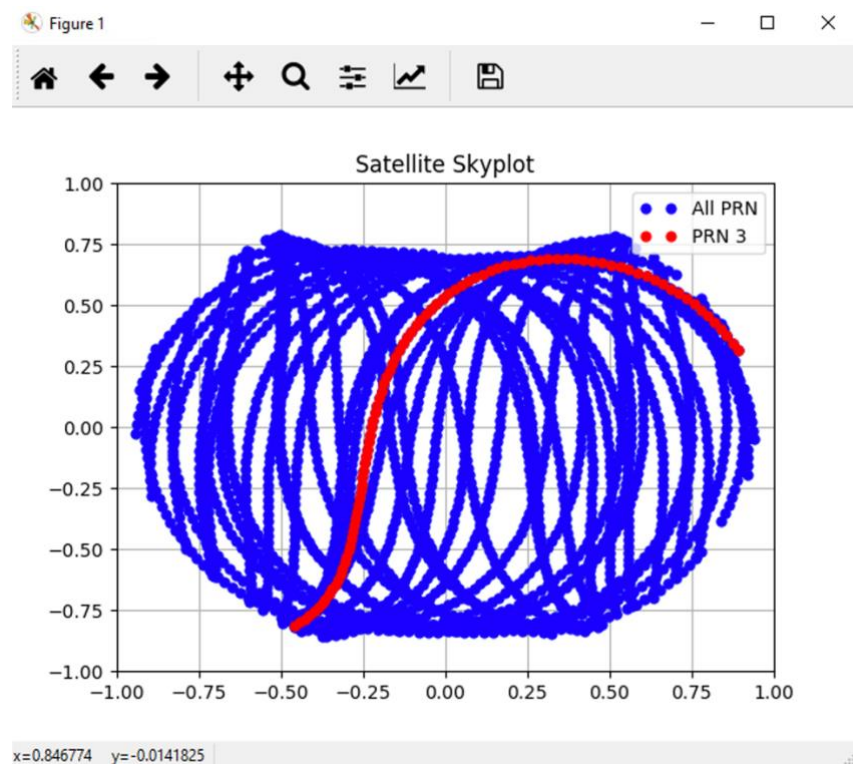


Figura 107. Skyplot receptor cerca del Ecuador modo SPP dinámico



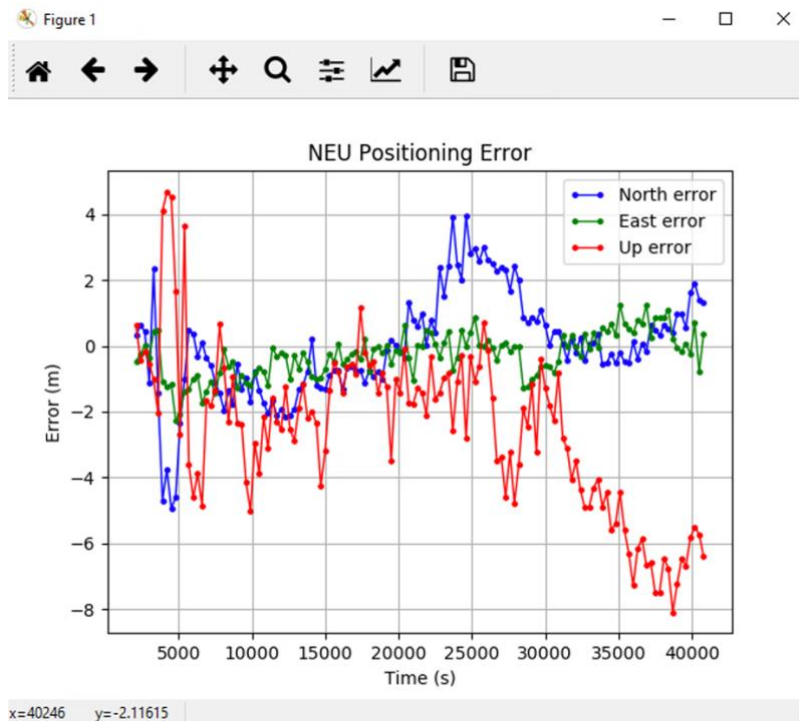


Figura 108. Error de posicionamiento NEU receptor de gama alta modo SPP dinámico

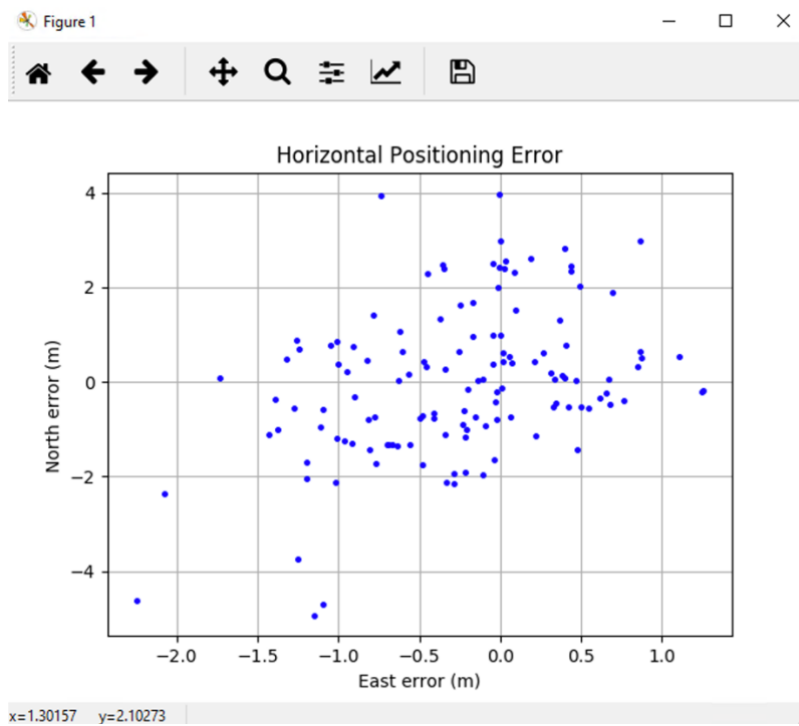


Figura 109. Error de posicionamiento horizontal receptor de gama alta modo SPP dinámico



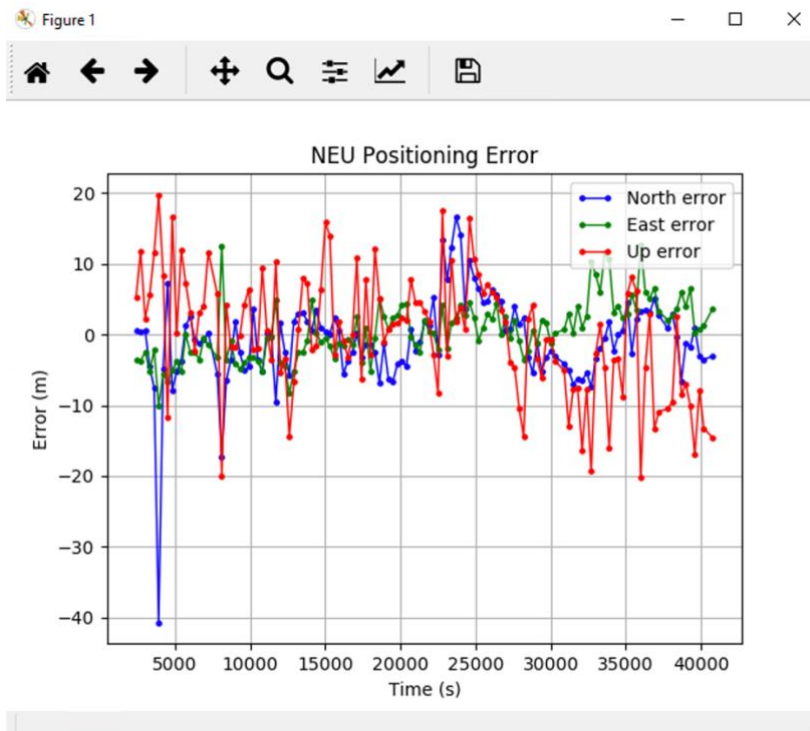


Figura 110. Error de posicionamiento NEU receptor de gama baja modo SPP dinámico

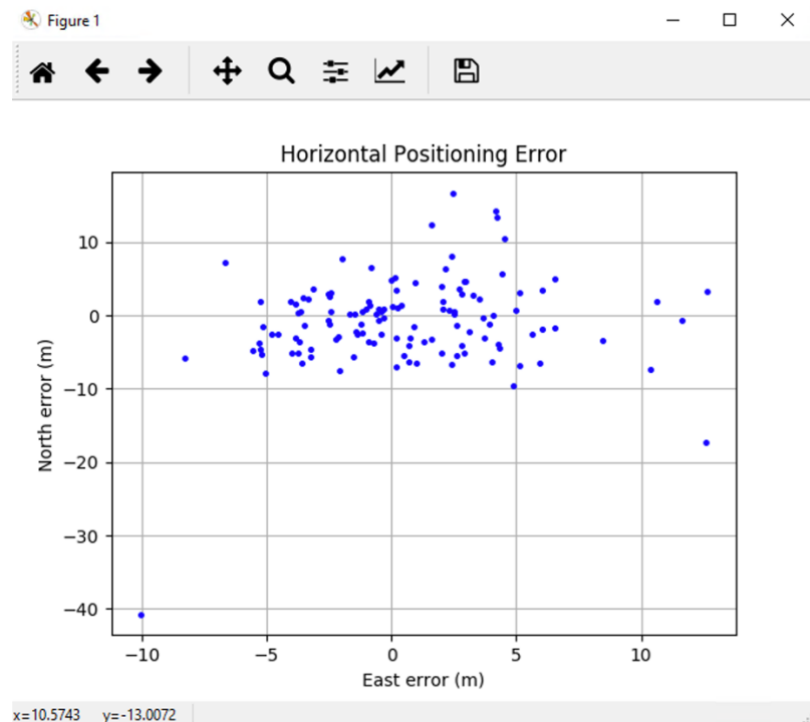


Figura 111. Error de posicionamiento horizontal receptor de gama baja modo SPP dinámico

## ANEXO IV. CAPTURAS E IMÁGENES PESTAÑA 'SBAS' DE GNSS STUDIO

En este anexo se detalla la información relativa al uso de la pestaña de 'SBAS' de *GNSS Studio*. Hay una subsección para cada una de las tres herramientas de esta pestaña.

### IV.A. CILINDRO SBAS

Se detallan a continuación ejemplos de los diferentes casos posibles en cuanto a la operatividad de un sistema SBAS. En cada imagen se muestra un ejemplo de selección que hay que hacer en la interfaz y la imagen correspondiente para dicha selección (ver Figura 112, Figura 113, Figura 114, Figura 115 y Figura 116).

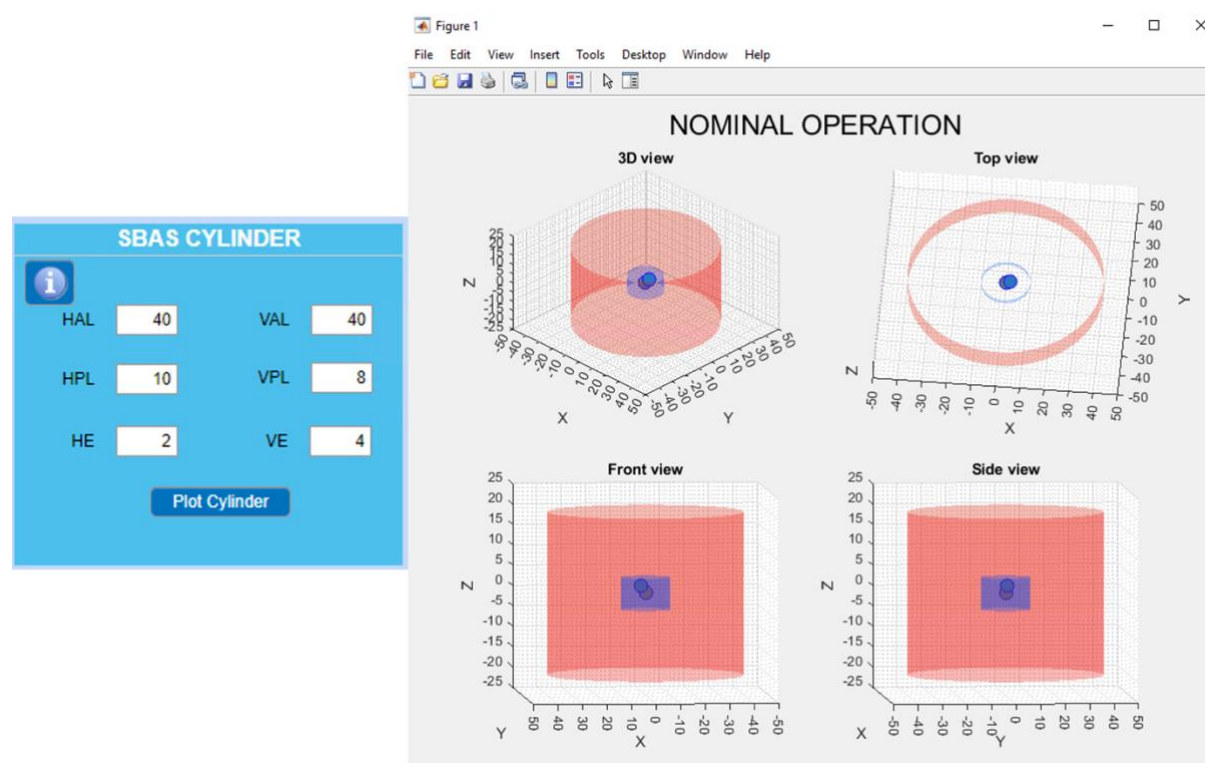


Figura 112. Ejemplo cilindro SBAS, Nominal Operation

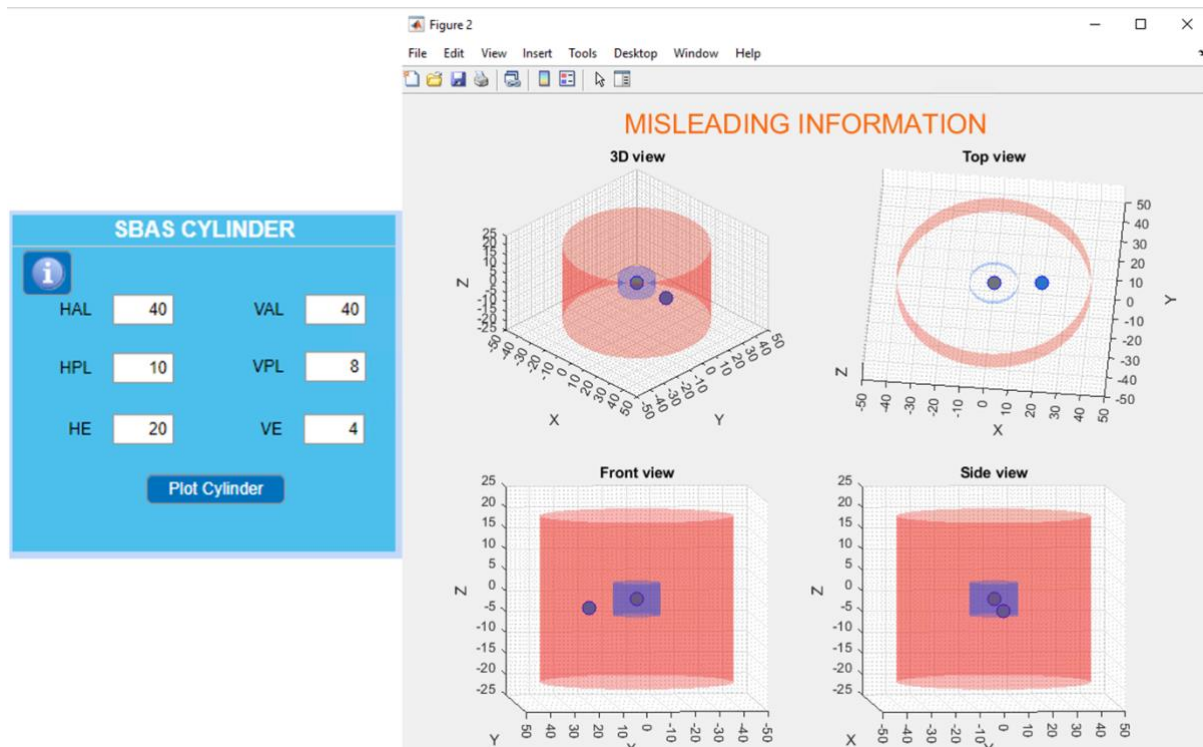


Figura 113. Ejemplo cilindro SBAS, Misleading Information

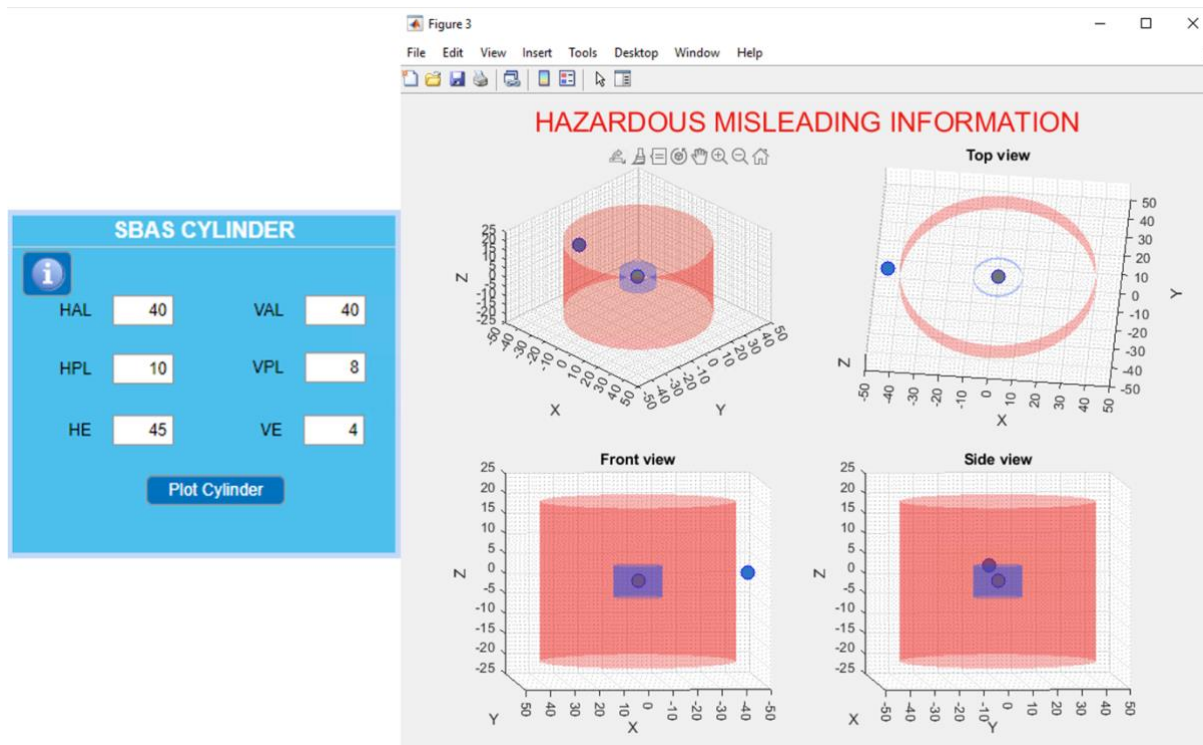


Figura 114. Ejemplo cilindro SBAS, Hazardous Misleading Information

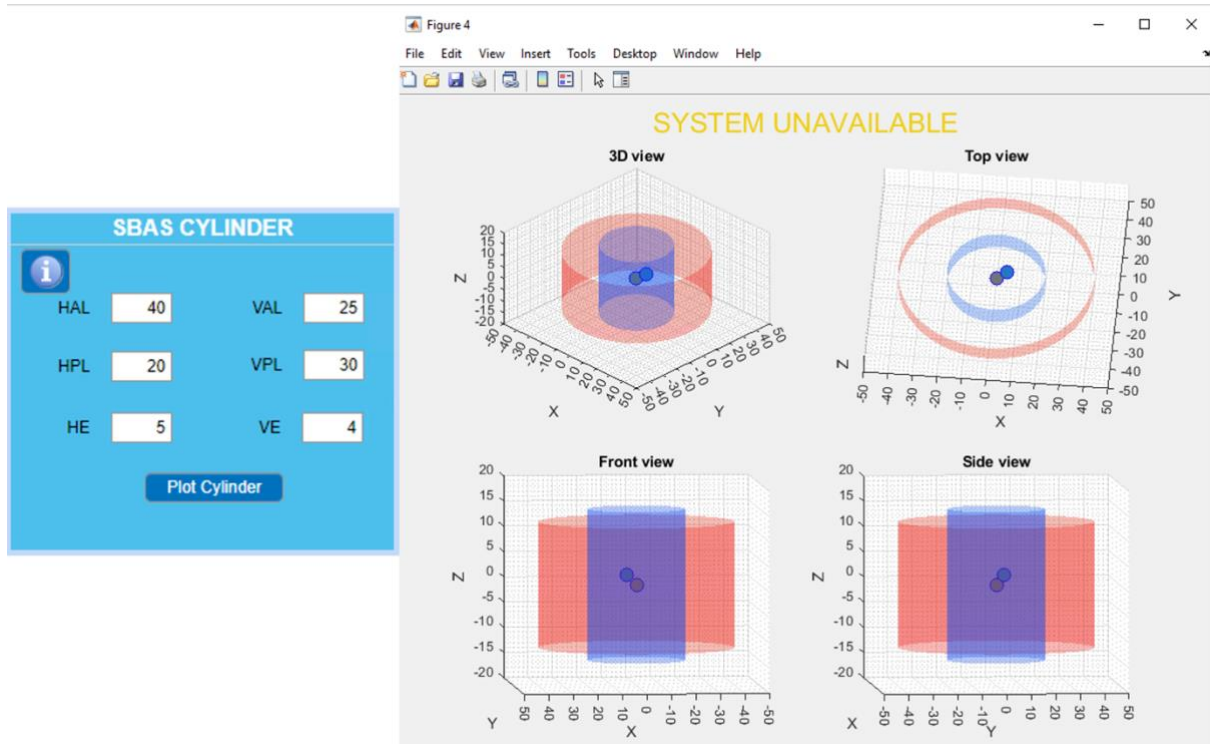


Figura 115. Ejemplo cilindro SBAS, System Unavailable

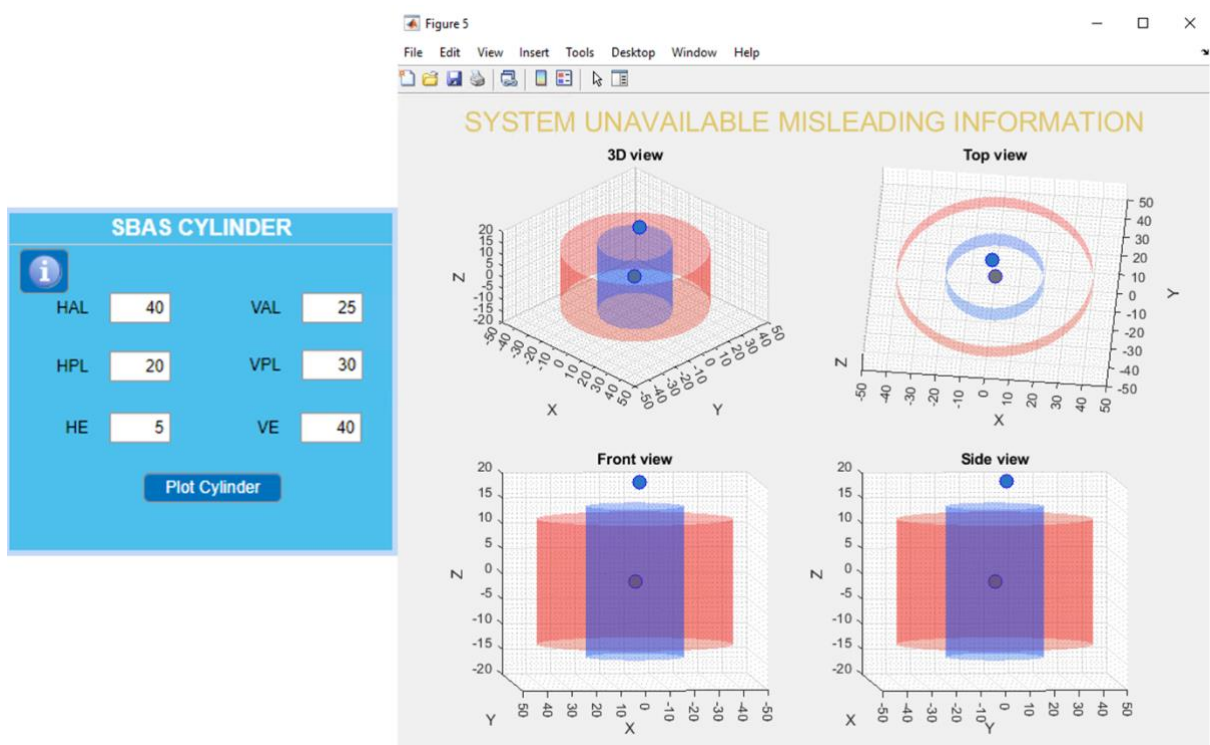


Figura 116. Ejemplo cilindro SBAS, System Unavailable Misleading Information

#### IV.B. STANDFORD DIAGRAM

La ventana de la herramienta de Stanford Diagram se muestra en la siguiente imagen (Figura 117).



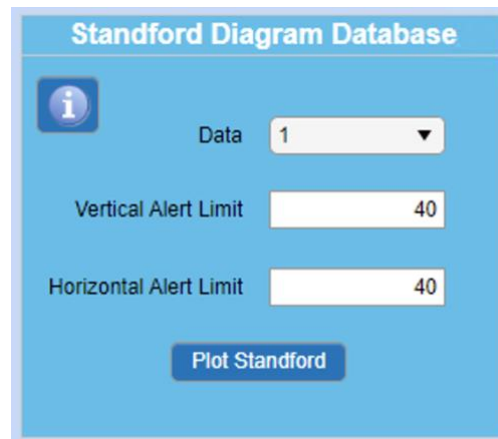


Figura 117. Ventana Stanford Diagram en GNSS Studio

Se muestran en las siguientes imágenes (Figura 118, Figura 119 y Figura 120) tres ejemplos para tres de las bases de datos disponibles.

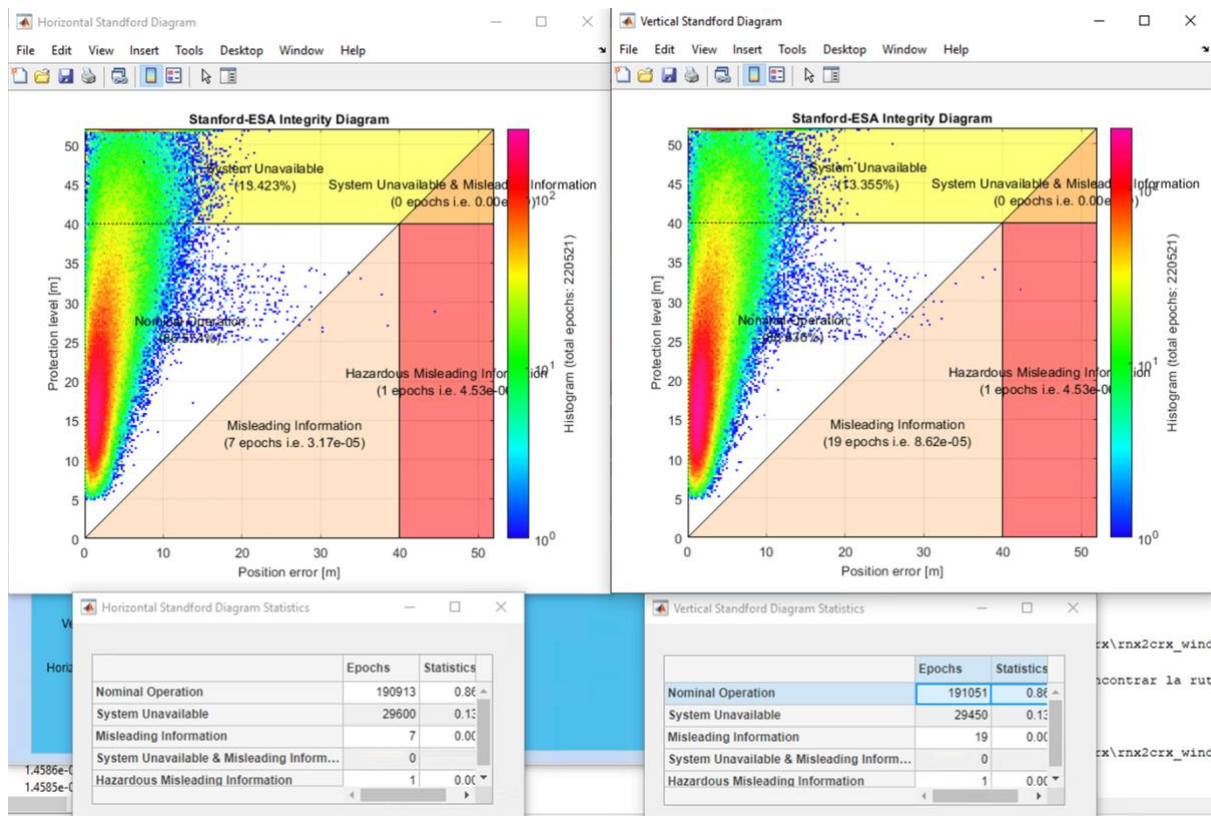


Figura 118. Ejemplo 1 Herramienta Stanford Diagram

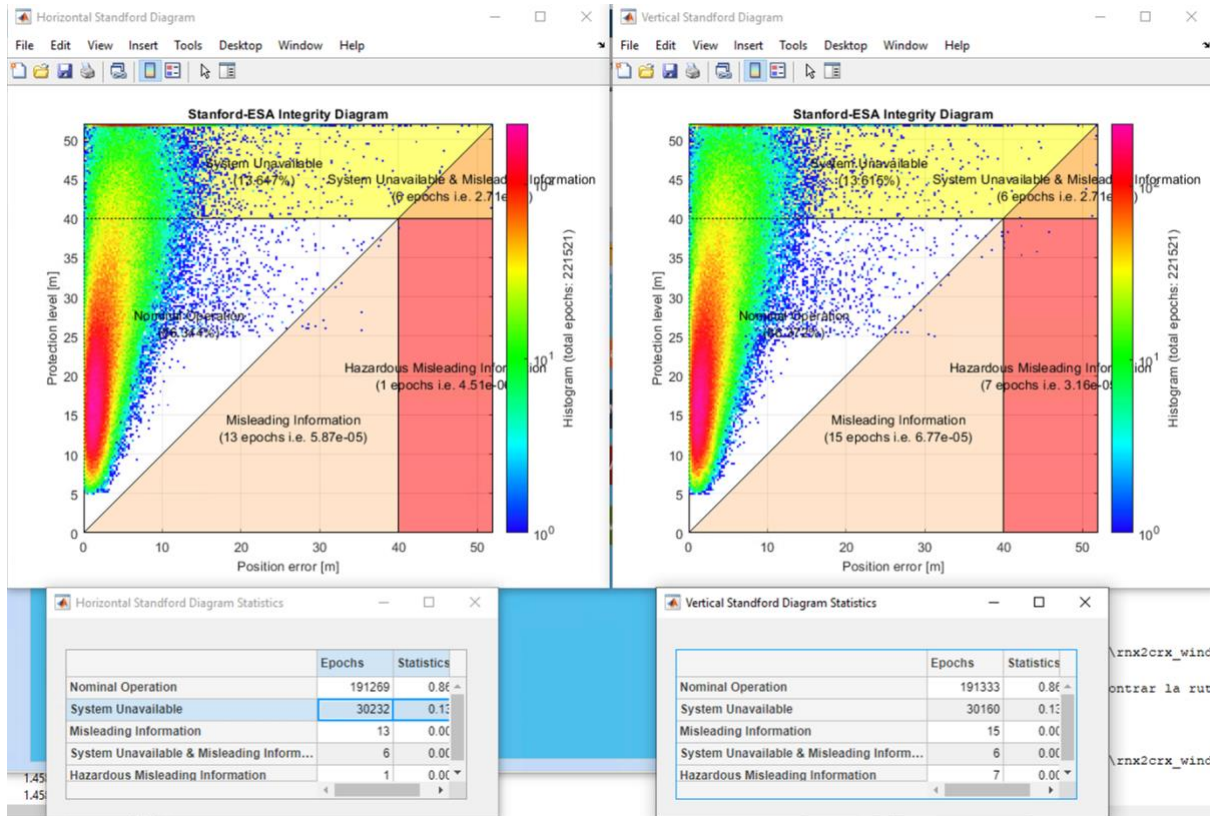


Figura 119. Ejemplo 2 Herramienta Stanford Diagram

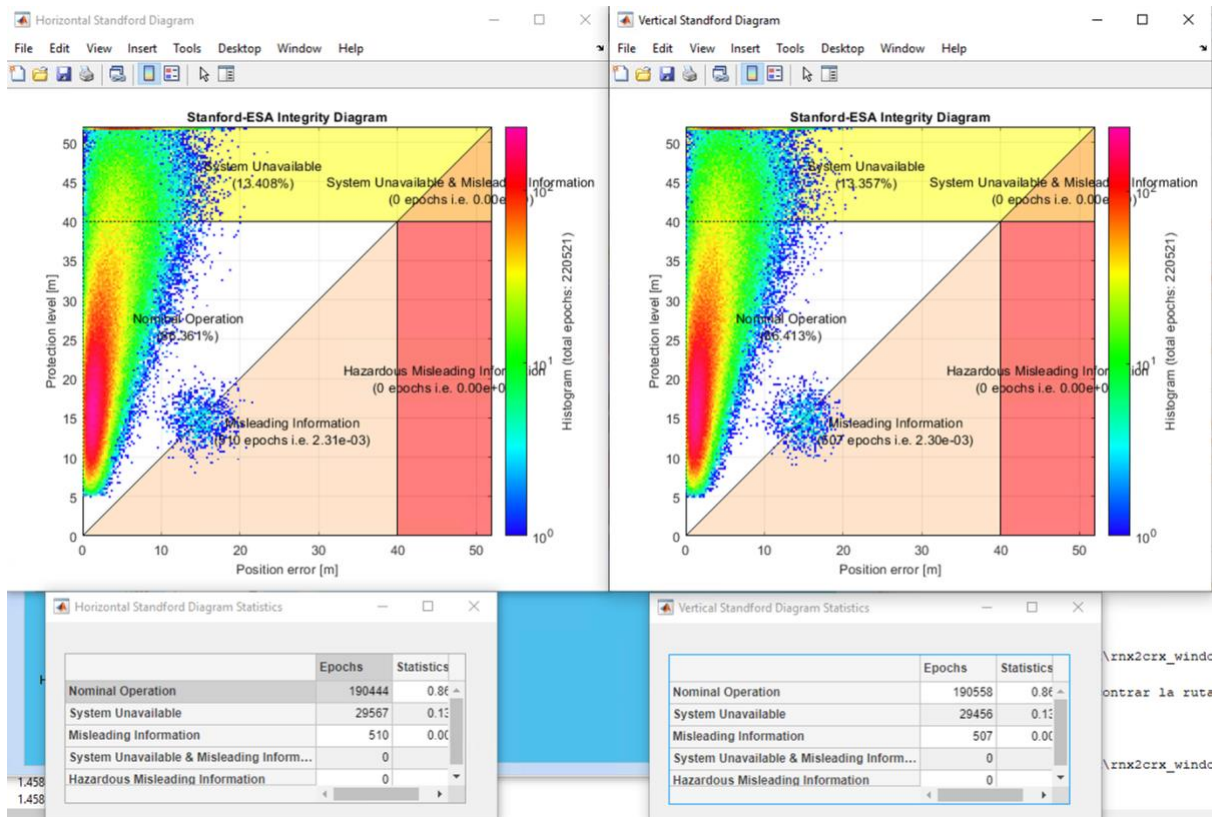


Figura 120. Ejemplo 3 Herramienta Stanford Diagram



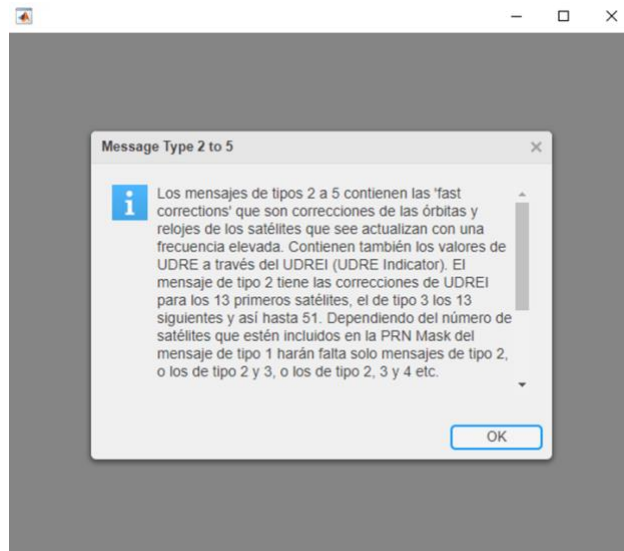


Figura 123. Ayuda Mensaje Tipos 2 a 5

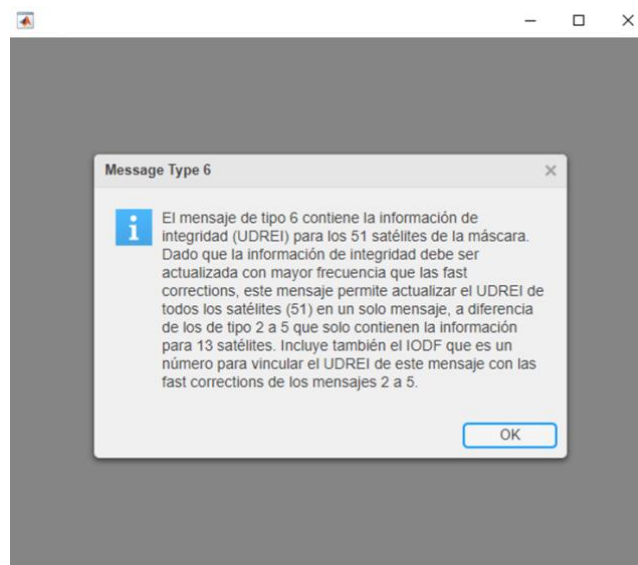


Figura 124. Ayuda Mensaje Tipo 6

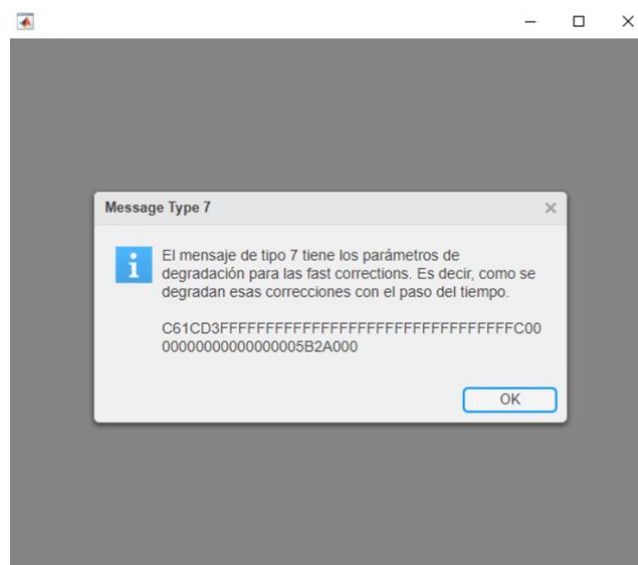


Figura 125. Ayuda Mensaje Tipo 7



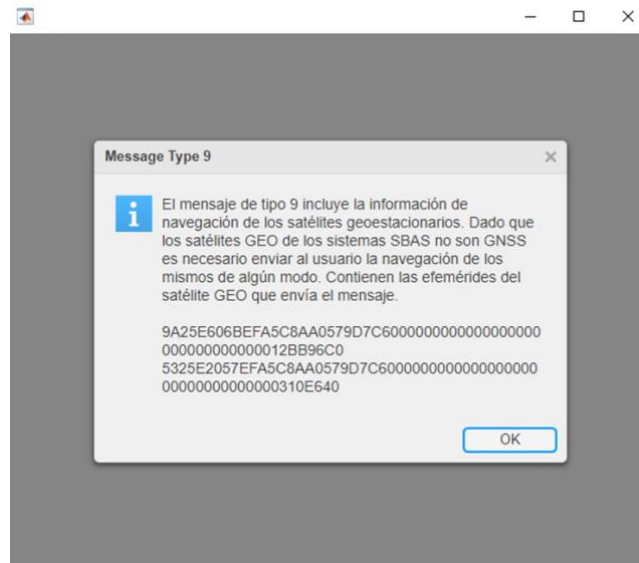


Figura 126. Ayuda Mensaje Tipo 9

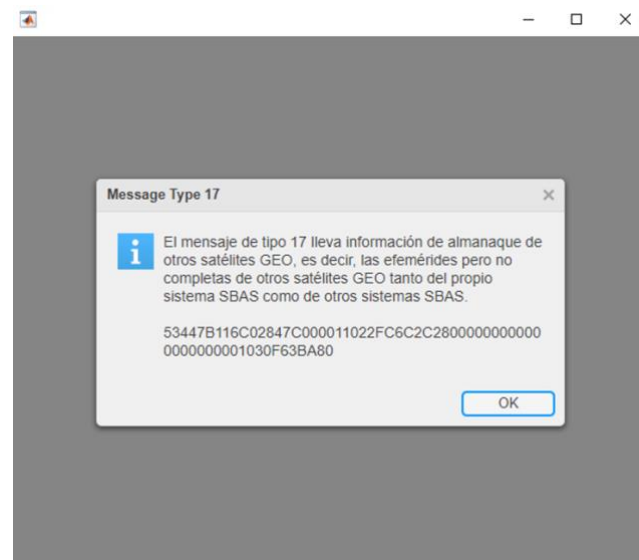


Figura 127. Ayuda Mensaje Tipo 17

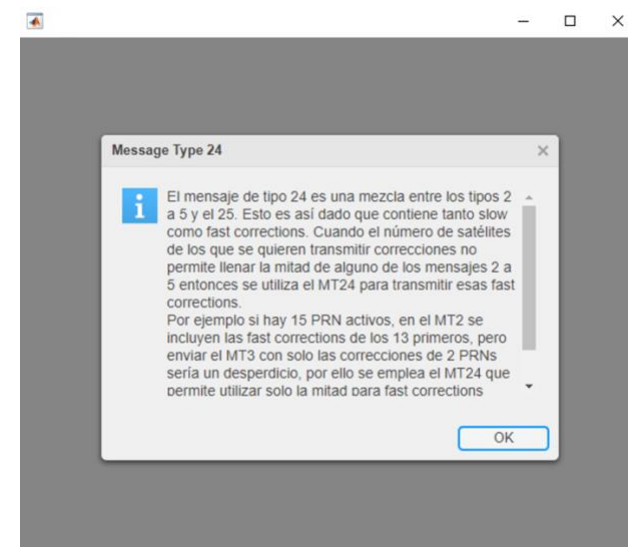


Figura 128. Ayuda Mensaje Tipo 24

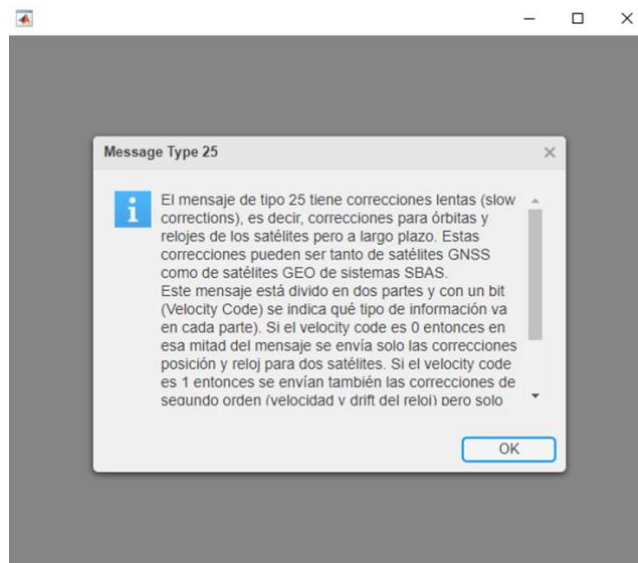


Figura 129. Ayuda Mensaje Tipo 25

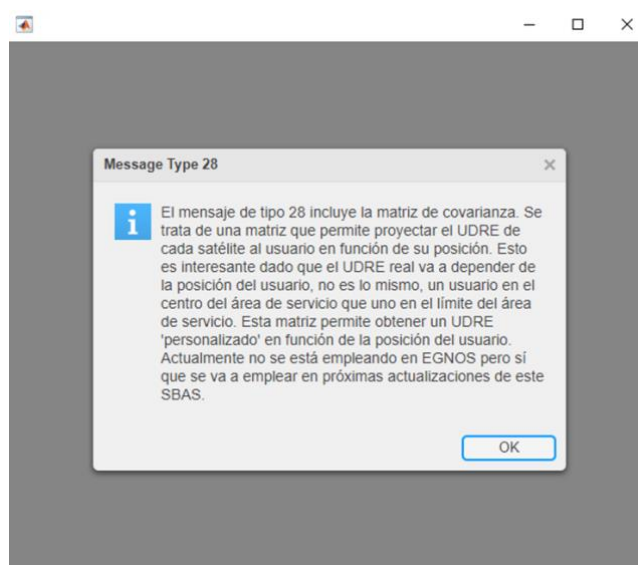


Figura 130. Ayuda Mensaje Tipo 28

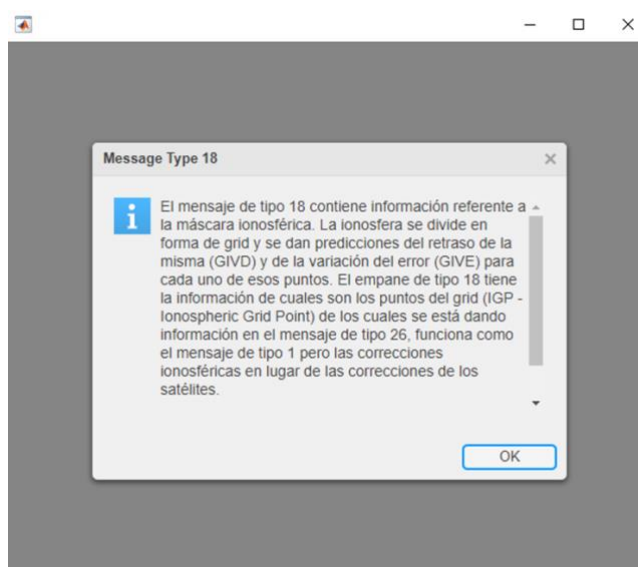


Figura 131. Ayuda Mensaje Tipo 18



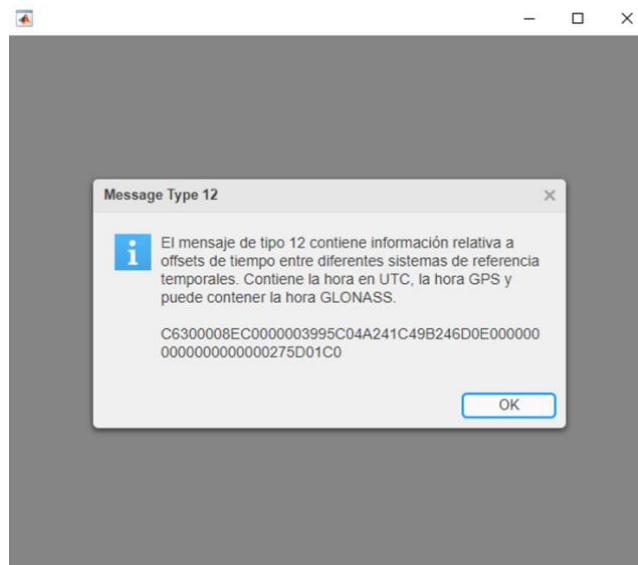


Figura 135. Ayuda Mensaje Tipo 12

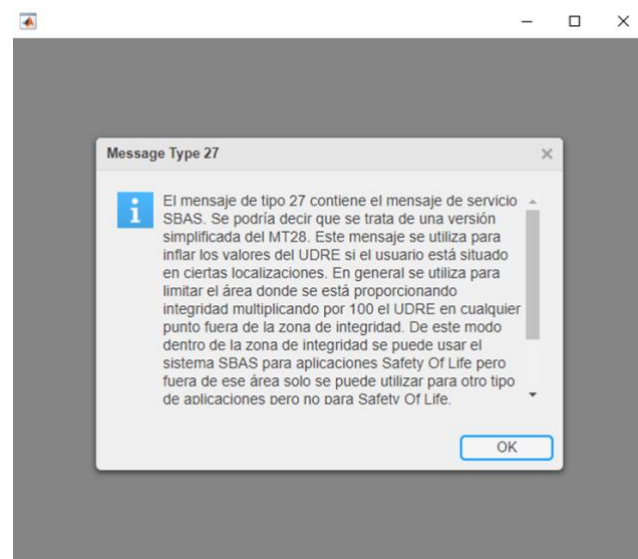


Figura 136. Ayuda Mensaje Tipo 27

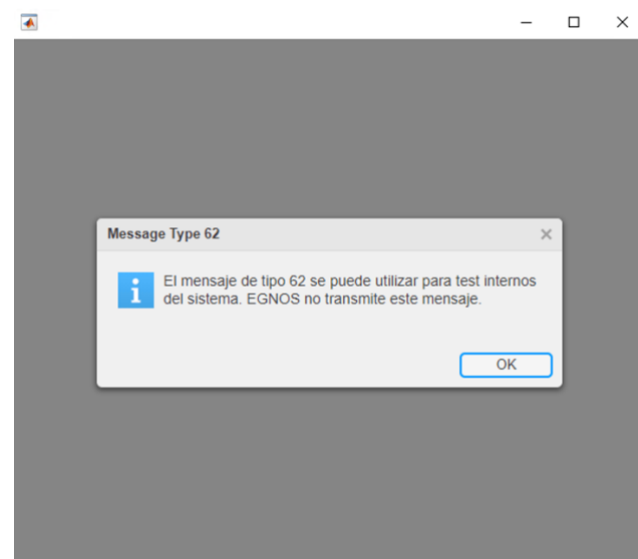
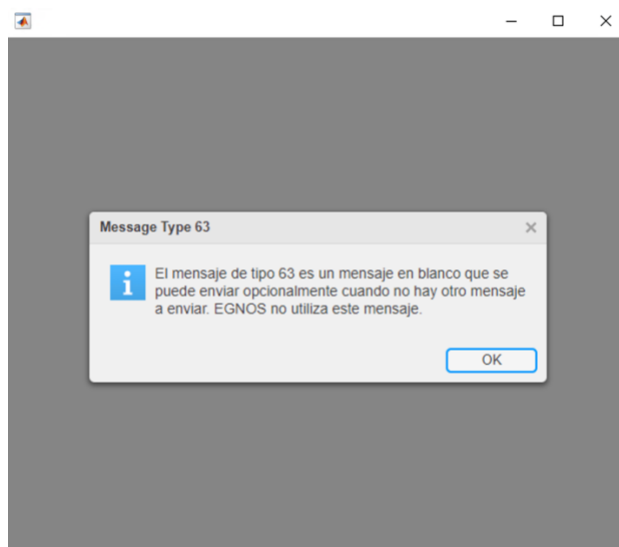


Figura 137. Ayuda Mensaje Tipo 62



*Figura 138. Ayuda Mensaje Tipo 63*